

Schlussbericht vom 15.08.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21172 N

Thema

Untersuchung zur Materialcharakterisierung von Feuerfest- und Fugenmaterial anhand von Druckerweichungsversuchen mit mehrteiligen Proben zur FE-Modellierung thermomechanischer Spannungen von Feuerfest-Zustellungen mittels Homogenisierungs-Verfahren

Berichtszeitraum

01.06.2020 - 30.05.2023

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft der Deutschen Keramischen Gesellschaft e.V. - FDKG

Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1:

Institut für Gesteinshüttenkunde (GHI), Lehrstuhl für Keramik
Forckenbeckstraße 33
52074 Aachen

Forschungseinrichtung 2:

Institut für Bildsame Formgebung (IBF)
Intzestraße 10
52072 Aachen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

0. Einleitung und Stand der Technik

Feuerfeste (FF) Werkstoffe werden überall dort eingesetzt wo direkter oder indirekter Wärmekontakt zu einem Hochtemperaturprozess besteht. Jährlich werden in Deutschland ca. 750.000 Tonnen Feuerfester Werkstoffe produziert wovon 50 % im Inland verbaut werden. Davon entfallen nahezu 100 % auf KMUs, mit einem Jahresumsatz von ca. 500 Mio. €. Feuerfest-Zustellungen sind neben Belastungen durch Korrosionsprozesse besonders durch thermomechanische Spannungen beeinträchtigt, welche durch die eingeschränkte Wärmedehnung der Zustellung verursacht werden. Am Beispiel einer Stahlpfanne lässt sich veranschaulichen, dass die Wärmedehnung der Zustellung radial nach außen weitgehend durch den umhüllenden Stahlmantel behindert wird. In Umfangsrichtung hingegen kann die Wärmedehnung beispielsweise durch in der Konstruktion vorgesehene Dehnfugen solange ungehindert stattfinden, bis die einzelnen Steine der Zustellung aufeinanderstoßen und somit eine weitere Ausdehnung verhindern.

Die aufgrund der eingeschränkten Wärmedehnung resultierenden Spannungen können einerseits innerhalb einzelner Bauteile oder auch in Steinen auftreten und können zu plastischer Verformung, Rissen und Materialversagen führen.

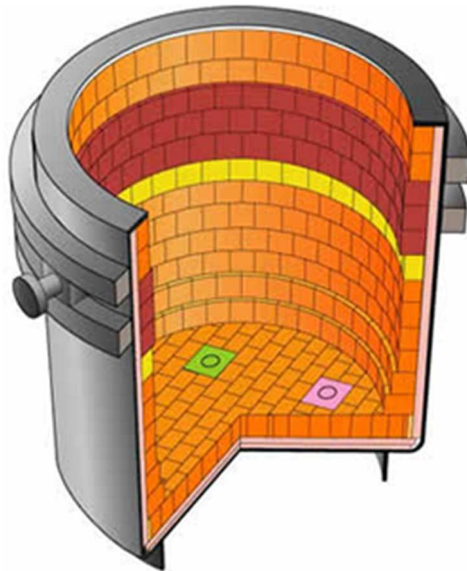


Abbildung 1: Von Stahlmantel umhüllte FF-Ausmauerung einer Stahlpfanne [1]

Aufgrund des Mangels schneller und exakter Simulationsmodelle werden bei der Auslegung von Anlagen hohe Sicherheitsfaktoren gewählt um Schäden zu vermeiden. Dabei werden häufig erfahrungsbasierte Werte anstelle von wissensbasierten Werten gewählt. Hohe Sicherheitsfaktoren führen dabei zu hohem Materialeinsatz und folglich auch zu höheren Kosten. Sind die auftretenden Lastfälle gut bekannt und die Simulationsmethoden hinreichend genau, können Sicherheitsfaktoren entsprechend geringer gewählt werden, sodass eine erhebliche Materialeinsparung ermöglicht wird. [2] In den letzten Jahren hat sich das Werkzeug der FE-Simulation immer weiter im Bereich der FF-Industrie etabliert, dadurch können fundierte Vorhersagen der auftretenden thermomechanischen Belastungen sowie Schadensfallanalysen durchgeführt werden. So kann die erfahrungsbasierte Auslegung von Anlagen, in eine wissensbasierte Auslegung überführt werden.

Bei der Entwicklung neuer bzw. Optimierung herkömmlicher Werkstoffe können zudem (bruch-)mechanische Simulationen entscheidende Parameter in einem Modell berechnen und zu einer werkstoffgerechten Auslegung von Konstruktionen beitragen [3].

Insbesondere spielt hier die thermomechanische Spannungsanalyse eine wesentliche Rolle, da sie mit der thermischen Dehnung des Feuerfestmaterials und der daraus resultierenden Spannungen einen Großteil des Verhaltens von feuerfesten Konstruktionen in variablen thermischen Betriebszuständen abbilden kann. Je genauer das Materialverhalten projiziert wird, desto genauer können die technisch relevanten Zielgrößen mittels FEM berechnet werden. Die Folge ist ein ressourceneffizienter Materialeinsatz, welcher eng mit den gesamtgesellschaftlichen Zielen verbunden ist.



Abbildung 2: Beispiel einer mit Mörtel verfugten Feuerfest-Zustellung [4]

In der Zustellung feuerfester Materialien werden in der Regel Fugen zwischen den einzelnen Elementen vorgesehen, welche entweder nicht verfüllt werden (Dehnfugen) oder, wie in Abbildung dargestellt, mit Fugenmaterial wie beispielsweise Mörtel verfüllt werden. In beiden Fällen erschwert dies die Simulation der Zustellung, da Feuerfest- und Fugenmaterial unterschiedliche Material-Eigenschaften besitzen. Daher hat sich im Bereich der Forschung in den letzten Jahren die Methode der Homogenisierung zur FE-Simulation feuerfester Materialien etabliert. Bei der Homogenisierung wird anhand von Referenz-Versuchen bzw. Simulationen das Gesamtverhalten von Feuerfest- und Fugenmaterial bestimmt, um ein homogenes Materialverhalten für die Modellierung annehmen zu können.

Dazu muss jedoch zunächst das Materialverhalten der einzelnen Komponenten bestimmt werden. Zur Parametrisierung von Materialmodellen wird meist auf thermische und mechanische Kennwerte zurückgegriffen, welche experimentell ermittelt werden. Es gibt zwar ein breites Spektrum an genormten Prüfverfahren zur Kennwert-Ermittlung feuerfester Materialien, dennoch werden häufig nicht genormte Verfahren oder spezielle experimentelle Versuchsaufbauten zur Materialcharakterisierung herangezogen. Selbst im Bereich der statischen E-Modul-Ermittlung besteht eine Lücke in der Norm zur Prüfung feuerfester Werkstoffe. Besonders für KMU ist der Zugang zu entsprechenden Materialdaten beziehungsweise von der Norm abweichenden Prüfverfahren dabei häufig nicht gegeben.

Daher wurde im Rahmen dieses Projekts untersucht, ob durch geringfügige Anpassungen bestehender Normversuche die nötigen Materialdaten zur Homogenisierung und FE-Simulation von FF-Zustellungen ermittelt werden können.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer Bestimmungsmethode, die anhand von genormten und verfügbaren Methoden das Bestimmen statischer E-Moduln sowie die Durchführung von Material-Homogenisierungen für Feuerfest-Materialien ermöglicht.

Ergebnisse in der FE-Simulation von feuerfesten Erzeugnissen bieten Vorteile für Unternehmen entlang einem Großteil der Prozess- und Wertschöpfungskette, sowie allen Wertschöpfungsketten, in denen feuerfester Erzeugnisse zum Einsatz kommen.

Industrieunternehmen, in denen feuerfest zugestellte Anlagen zum Einsatz kommen, können durch wissensbasiert ausgelegte Anlagen mit längeren Standzeiten, geringeren Ausfallwahrscheinlichkeiten und längeren Wartungsintervallen rechnen, was geringere Kosten für die angebotenen Dienstleistungen und Produkte zur Folge hat. Ingenieurarbeiten, die auf Anlagenkonstruktion und -design ausgelegt sind, können mittels genauerer FE-Rechnungen Spannungszustände besser abbilden und analysieren.

Kreuzer et al. [5] postulierten 2018, dass FE-Simulationen für die Auslegung von FF-Anlagen unabdingbar sind, um die Einflüsse von thermomechanischen Beanspruchungen und chemischer Korrosion abzuschätzen und so die Intaktheit der Anlagen zu gewährleisten. In den letzten Jahren haben sich bereits einige Untersuchungen mit der Abbildung von Feuerfest-Zustellungen und der thermomechanischen Spannungsberechnung mittels FEM befasst.

Bei Feuerfest-Zustellungen handelt es sich in der Regel um eine Kombination aus feuerfesten Materialien bei denen die einzelnen Elemente durch Fugen voneinander getrennt sind.

Andreev und Harmuth [6] beispielsweise modellierten in der Konstruktion vorgesehene Dehnfugen zu benachbarten Steinen durch die Verwendung starrer Elemente, die in einem entsprechendem Abstand zum eigentlichen Stein platziert wurden, um die Spannungen, die durch eine eingeschränkte Wärmeausdehnung entstehen, abzubilden. Dieser Ansatz liefert für die Betrachtung repräsentativer Elemente vielversprechende Ergebnisse. Modelle, welche das Feuerfest- und das Fugenmaterial getrennt darstellen, werden typischerweise auch als mikroskopische Ansätze bezeichnet. Wendet man diese mikroskopischen Ansätze jedoch auf die Modellierung ganzer Anlagen an, müsste jede Fuge einzeln modelliert werden, sodass eine große Anzahl an Elementen notwendig wäre, was mit einem hohen Rechenaufwand einhergeht.

Daher hat sich im Bereich der Forschung in den letzten Jahren der Ansatz der makroskopischen Modellierung im Bereich von Feuerfest-Zustellungen etabliert. Dabei wird im Rahmen einer sogenannten Homogenisierung durch Referenz-Versuche und/oder -Simulationen das Gesamtverhalten der Zustellung bestimmt [7]. Eine Veranschaulichung beider Ansätze ist in Abbildung 3 gezeigt. Dieses Gesamtverhalten ist nicht nur von den verwendeten Materialien abhängig, sondern meist auch stark richtungsabhängig, da in Zustellungen das Verhältnis von Feuerfest- zu Fugen-Material in Höhen- Breiten- und Dickenrichtung meist unterschiedlich ist. Dadurch muss für jeden Anwendungsfall, der modelliert werden soll, das Gesamtverhalten der jeweiligen Zustellung bestimmt werden [8].

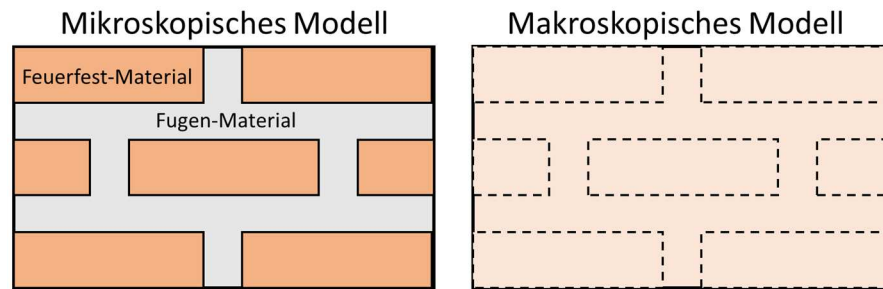


Abbildung 3: Schematische Darstellung von mikroskopischen und makroskopischen Materialmodellen

Zucchini und Lourenco [9] untersuchten Homogenisierungsansätze für verschiedene Kombinationen von Mauerwerk und Mörtel unter einachsigem Druck. Die Validierung erfolgte mittels uniaxialen Stauchversuchen an mehrteiligen Proben. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Verwendung homogener Materialdaten in FE-Simulationen im Vergleich zu einem makroskopischen Ansatz, nahezu identische Ergebnisse bei deutlich geringerer Rechenzeit liefert. Für Dehnfugen ohne Füllmaterial konnten Andreev et al. [10] sowie Nguyen et al. [11] anhand von Stauchversuchen an zweigeteilten Proben und biaxialen Druckversuchen ein Kriterium für den thermisch bedingten Fugenschluss für ein homogenisiertes Material entwickeln und validieren.

Gasser et al. [12,13] entwickelten zudem ein 2D-Hüllenelement, das das Materialverhalten von Feuerfest-Material mit eingebetteten Stahlankern beschreibt, um so auch komplexe Anlagen-Geometrien in FE-Simulationen abbilden zu können. Dabei ist das 2D-Element zweilagig. Es besteht aus einer inneren Lage, welche die monolithische FF-Zustellung beschreibt, und einer äußeren Lage, welche die Stahl-Schicht mit Ankern abbildet. Zur Materialcharakterisierung wurden dabei Ausziehversuche sowie maßstabsgetreue 4-Punkt-Biegeversuche durchgeführt.

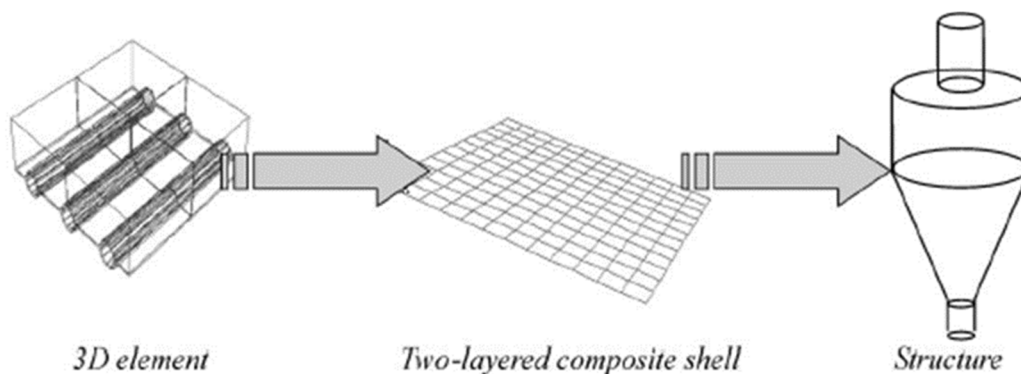


Abbildung 4: FE-Modell von Feuerfest-Material mit eingebetteten Stahlankern sowie Schema der Umwandlung in ein 2D-Element zur Abbildung komplexer Strukturen [12]

Unabhängig davon, ob ein mikroskopischer oder makroskopischer Ansatz zur Modellierung der FF-Zustellung gewählt wird, muss zur möglichst genauen Modellierung des Materialverhaltens, neben dem linear-elastischen Verhalten, auch das plastische Verhalten sowie die Schädigung durch Rissbildung [14] und das Kriechverhalten [15] der Materialien berücksichtigt werden. Zur

Abbildung dieser Effekte in FE-Simulationen werden entsprechende Modelle verwendet, welche zunächst experimentell parametrisiert werden müssen. Neben der direkten Bestimmung von Kennwerten anhand von experimentellen Daten bietet sich für schwer messbare Größen das Verfahren der inversen Modellierung an.

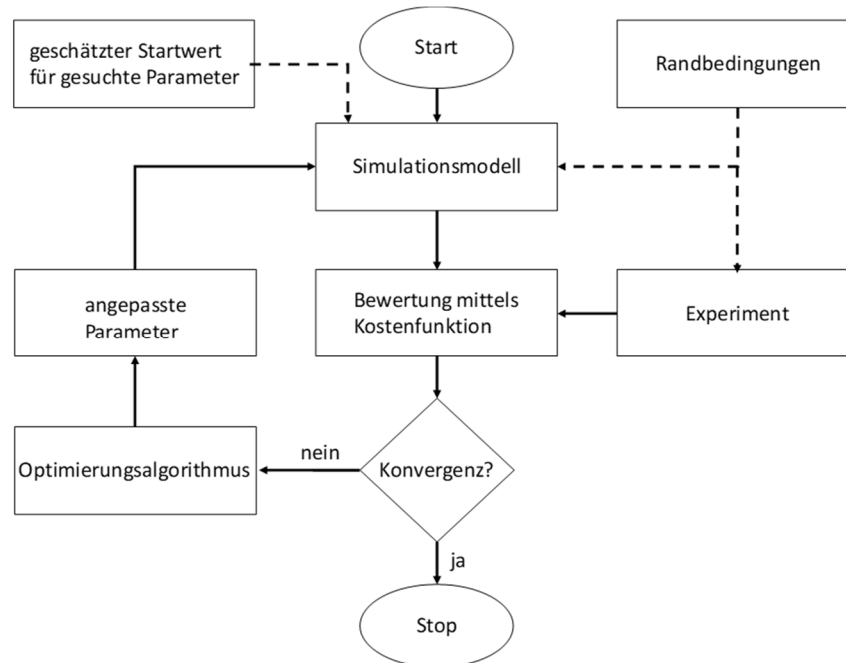


Abbildung 5: Flussdiagramm zum Ablauf der inversen Modellierung

Das Grundprinzip der inversen Modellierung beruht auf der iterativen Optimierung von Eingangsparametern einer Simulation. Die inverse Modellierung besteht im Wesentlichen aus 3 Teilen: einem Experiment, einem Optimierungsalgorithmus und einem Simulationsmodell [16].

Das Experiment liefert dabei eine oder mehrere leicht messbare Größen, die mit den Simulationsergebnissen verglichen werden können. Das Simulationsmodell benötigt dazu zu Beginn geschätzte Werte für die gesuchten Parameter. Zur Beurteilung der Abweichung experimenteller Ergebnisse von Simulationsergebnissen wird eine sogenannte Kostenfunktion verwendet, ein typisches Beispiel ist die Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Der Optimierungsalgorithmus erlaubt die automatische Anpassung der gesuchten Eingangsparameter, bis die Kostenfunktion ein Minimum erreicht oder ein Abbruchkriterium erfüllt ist [17,18]. Abb. 5 zeigt schematisch den Ablauf des Optimierungsprozesses anhand eines Flussdiagramms.

1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum

1.1. Ermittlung und Validierung von Materialdaten (AP1)

Ziel: Hinreichend genaue Ermittlung von E-Modul und thermischer Dehnung für alle Materialdaten, sowie Validierung der Materialdaten mittels FE-Simulation. Dadurch ist gewährleistet, dass für die Untersuchung des Verbundes Feuerfest-Fuge lediglich der Einfluss der Fuge unbekannt ist.

1.1.1. Ermittlung von E-Modul und thermischer Dehnung (GHI)

Durchgeführte Arbeiten: In der Materialwissenschaft unterscheidet man zwischen dem statischen und dem dynamischen E-Modul. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in Bezug auf die Bedingungen, unter denen die Messungen durchgeführt werden [19]. Wird eine Probe zum Schwingen angeregt, so kann diese Verformung als adiabatisch betrachtet werden. Das bedeutet, dass ein Prozess ohne Wärmeaustausch zwischen dem System und seiner Umgebung abläuft [19]. In diesem Sinne bezieht sich das System auf die mechanische Ausbreitung der Schallenergie, und die Umgebung ist das Medium, durch das sie sich ausbreitet [19]. Sone beschreibt die dynamische Messung des E-Modul daher als eine Momentaufnahme der elastischen Eigenschaften zu einem bestimmten Zeitpunkt des Versuchs [20]. Da sich Schallwellen in steiferen Materialien schneller ausbreiten, resultiert eine höhere Schallgeschwindigkeit in einem höheren dynamischen E-Modul [21]. Zur Messung des dynamischen E-Modul werden verschiedene Methoden wie die Resonanzfrequenzmethode, Ultraschallprüfung und Modalanalyse verwendet [22].

Bei der Statischen E-Modul-Messung kann die Verformung als isotherm angesehen werden, bei der sich das System ändert, aber während des gesamten Prozesses eine konstante Temperatur beibehält [19]. Messungen des statischen E-Moduls erfolgen über wesentlich längere Zeiträume und zeigen typischerweise wesentlich größere Spannungsänderungen als vergleichbare dynamische Messungen [19]. Ein hoher statischer E-Modul ist Ausdruck einer hohen Steifigkeit des Materials, da es sich unter Belastung nur wenig verformt [23]. Methoden zur Messung des statischen E-Moduls umfassen unter anderem Zug-, Druck- und Biegeversuche [22]. Die Vergleichbarkeit dieser Untersuchungen, die sich auf statische und dynamische Messungen des E-Moduls beziehen, beruht auf der Annahme, dass das adiabatisch-isotherme Verhalten analog zur statisch-dynamischen Beziehung betrachtet wird [19]. Im Allgemeinen ist der dynamische E-Modul etwas höher als der statische Wert [24]. Die Diskrepanzen zwischen dem dynamischen und dem statischen E-Modul werden häufig auf Mikrorisse und Poren im Material zurückgeführt, da diese bei schnell wechselnden Belastungen weniger Zeit haben, sich zu verformen oder Umstrukturierung vorzunehmen [24, 20].

Grundlagen der Balkentheorie

Abbildung 6 zeigt den schematischen Aufbau eines Dreipunktbiegeversuchs. In diesem kann die Durchbiegungskurve eines einfach abgestützten Balkens verwendet werden, um den *E-Modul* (E) zu bestimmen. Das E-Modul kann bei bekannter Biegekraft (F) und Durchbiegung (f) unter den Annahmen der Balkentheorie berechnet werden [25].

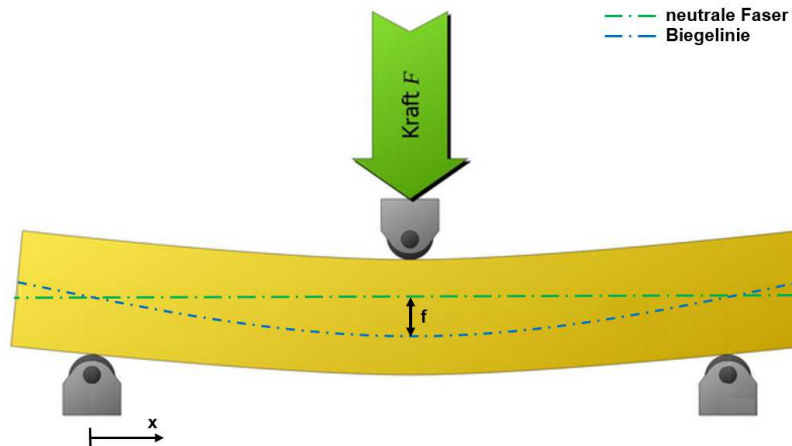


Abbildung 6: Darstellung der Durchbiegung eines einfach eingespannten Balkens bei Dreipunktbiegung.

Die Balkentheorie zielt darauf ab Formeln und Berechnungen für Spannungen und Verformungen bereitzustellen [26]. Die Euler-Bernoulli-Balkentheorie stützt sich dabei auf einige grundlegende Annahmen, um das Biegeverhalten von Balken darstellen zu können. Es wird davon ausgegangen, dass das Material homogen und isotrop ist und sich elastisch verhält, was bedeutet, dass die Durchbiegung des Balkens innerhalb des Gültigkeitsbereichs des Hooke'schen Gesetzes bleibt [27]. Zudem wird angenommen, dass die Querschnitte des Balkens nach der Verformung eben bleiben und senkrecht zur neutralen Faser stehen [27]. Die neutrale Faser eines Balkens bezeichnet die Linie oder Ebene innerhalb des Materials, die sich während des Biegeprozesses weder verkürzt noch verlängert [26]. In einem Dreipunkt-Biegeversuch teilt die neutrale Faser die Probe in zwei Bereiche: Oberhalb der neutralen Faser entstehen Druckspannungen, während unterhalb der neutralen Faser Zugspannungen auftreten. Die neutrale Faser selbst ist von diesen Spannungen unberührt [28]. Dies ermöglicht eine genaue Darstellung der Biegeform ohne den Einfluss von Druck- oder Zugspannungen, wodurch sich die neutrale Faser besonders gut für die Analyse und Modellierung des Biegeverhaltens eines Trägers eignet [26]. In allen Versuchen dieser Arbeit wurde die Biegelinie an der neutralen Faser bestimmt, um die mechanischen Eigenschaften zu berechnen.

Digitale Bildkorrelation

Die digitale Bildkorrelation (Digital Image Correlation) oder auch DIC ist eine optische Methode zur Messung von Veränderungen in digitalen Bildern. Sie wird zur Analyse von dynamischen Prozessen und Objektdeformationen eingesetzt [22]. Bei der Auswertung dynamischer Vorgänge können Messgrößen wie Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung von Messobjekten durch die Verwendung von Referenzpunktmarken präzise in 3D analysiert werden. Die

Deformationsmessung basiert auf der Idee, ein stochastisches Muster auf der Oberfläche des Messobjekts aufzubringen und die Bilder verschiedener Belastungsstufen zu vergleichen. Wird das stochastische Muster über die gesamte Oberfläche der Probe aufgetragen, ermöglicht dies eine vollständige Flächenanalyse. Dabei wird die Dehnung bzw. Stauchung von kleinen Pixel-Untergruppen gemessen, die im Folgenden als Facetten bezeichnet werden (Abb. 7).

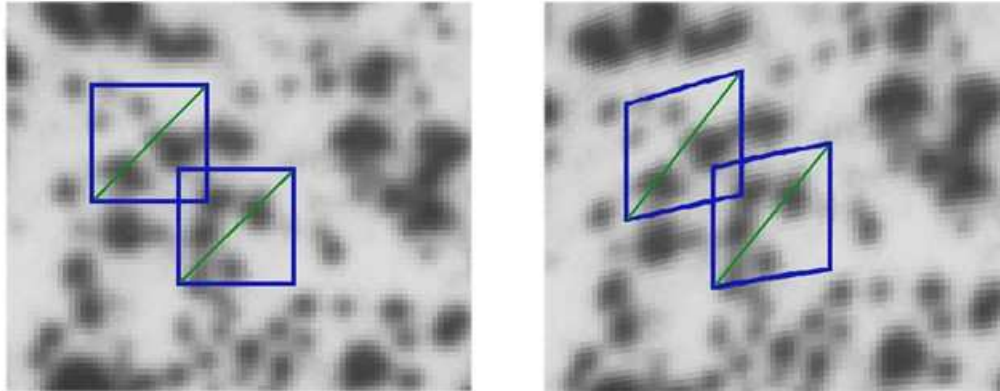


Abbildung 7: Darstellung zweier Facetten eines stochastischen Musters: Links die Referenzmessung ohne Belastung, rechts die Probe unter Belastung. Die resultierende Deformation unter Belastung führt zu einer deutlichen Verzerrung der Facetten, wie auf der rechten Seite zu erkennen.

Die Muster entstehen durch Aufsprühen feiner Lacksprenkel, was eine zufällige Verteilung der Bildinformationen erzeugt. Diese Verteilung erleichtert die Identifizierung jeder Facette in ihrer unmittelbaren Umgebung, da die Wahrscheinlichkeit einer zufälligen Wiederholung des Musters sehr gering ist [29]. Die DIC verwendet Schwarzweißbilder, in denen jedem Pixel ein Grauwert aus 256 möglichen Stufen zugeordnet ist, wobei 0 Schwarz und 255 Weiß entspricht. Betrachtet man nun eine beliebige Gerade innerhalb der Facette, beispielsweise ihre Diagonale (Abb. 7, grün), so kann diese als eine Reihe von Grauwerten interpretiert und als Säulendiagramm dargestellt werden (Abb. 8).

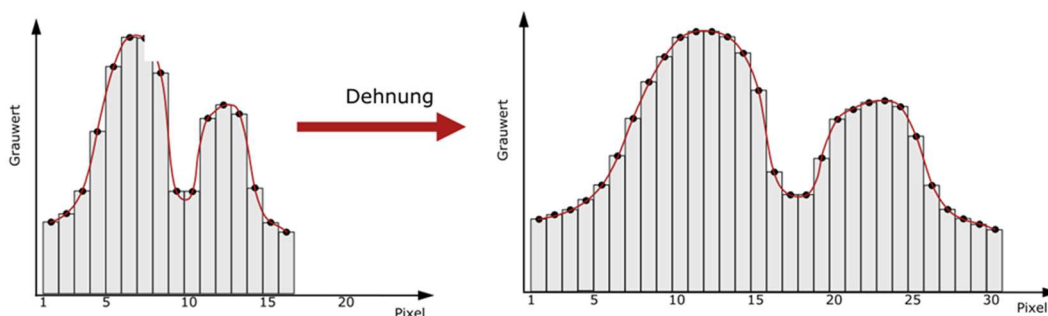


Abbildung 8: Darstellung der Grauwertverteilung entlang der Diagonalen einer Facette in zwei Zuständen: ohne Belastung (links) und unter Belastung (rechts). Trotz der Dehnung durch die Belastung bleibt die grundlegende Grauwertstruktur erhalten. Diese Konsistenz führt zu einer perfekten Korrelation, ausgedrückt durch einen normierten Kreuzkorrelationswert von eins

In dieser Darstellung repräsentiert die X-Achse die Position des Pixels entlang der betrachteten Geraden, während die Y-Achse den zugehörigen Grauwert angibt. Diese diskrete Grauwertverteilung kann durch eine Subpixel-Interpolation als kontinuierliche Funktion ausgedrückt werden, die in Abbildung 8 als rote Kurve dargestellt ist. Diese Funktion stellt ein charakteristisches Merkmal jeder Facette dar. Auch nach einer Dehnung bleibt die Facette eindeutig identifizierbar, da sich zwar die Skalierung der Funktion ändert, die Grundcharakteristik jedoch erhalten bleibt (Abb. 8) [22]. Diese Ähnlichkeit der beiden Grauwertverteilungen wird quantitativ durch die Berechnung der normierten Kreuzkorrelationsfunktion bestimmt [29, 30]. Ein Wert von 1 in dieser Funktion zeigt eine perfekte Übereinstimmung der Grauwertverteilungen zwischen den Vergleichsbildern an. Ein Wert von 0 zeigt an, dass keine erkennbare Beziehung zwischen den beiden Facetten besteht. Es ist wichtig zu beachten, dass dieser Vergleich nur auf der grundlegenden Charakteristik der Grauwertverteilung beruht, die auch nach einer Verformung im Wesentlichen konstant bleibt. Um nun die genaue Verschiebung und Dehnung der Facette im belasteten Zustand zu bestimmen, werden Position und Form systematisch angepasst - verschoben und verzerrt - bis eine maximale Übereinstimmung der Grauwertverteilungen erreicht ist. Dieser Optimierungsprozess wird durch den Einsatz numerischer Verfahren wie dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus durchgeführt [30]. Schließlich werden die Ergebnisse der einzelnen Facetten zusammengeführt, um eine Deformationsanalyse über die gesamte Probenoberfläche zu erhalten.

Zur Bestimmung der 3D-Koordinaten der Facetten wird eine stereographische Kameraanordnung und das Prinzip der Triangulation verwendet, wie in Abb. 9 dargestellt. Triangulation ist ein Verfahren zur Bestimmung der Position eines beliebigen Punktes im Raum durch Messung der Winkel zu diesem Punkt von zwei bekannten Orten (Kamerapositionen) aus [31]. Um genaue Messdaten zu gewährleisten, ist eine genaue Kalibrierung des Messsystems unerlässlich. Dazu wird eine Kalibrierplatte in verschiedenen Positionen und Orientierungen durch das Messvolumen bewegt und fotografiert. Auf diese Weise können wesentliche geometrische Parameter wie die Position und Ausrichtung der Kameras sowie die Abbildungseigenschaften des Objektivs bestimmt werden. Sind alle diese Parameter bekannt, ist eine korrekte Umrechnung der Pixelwerte in Längeneinheiten gewährleistet.

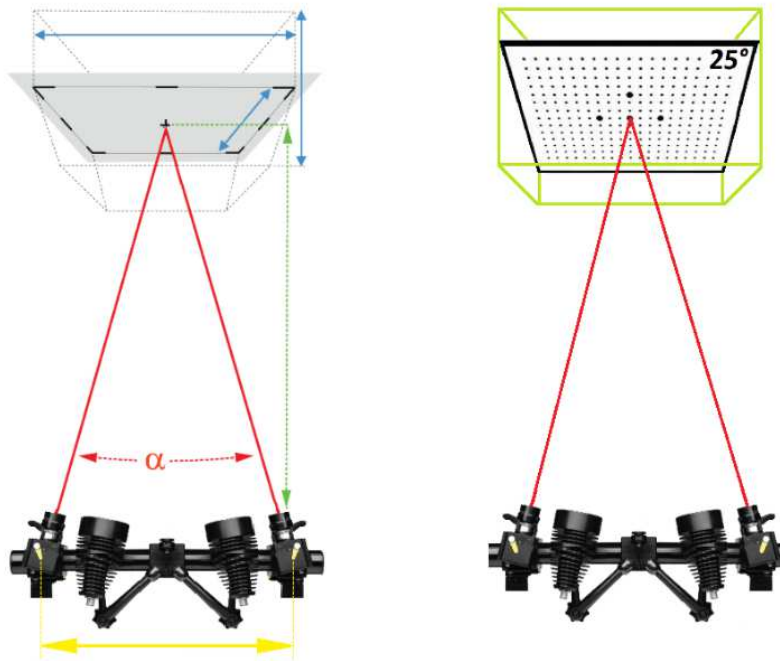


Abbildung 9: Stereographischer Kameraaufbau für 3D-Messungen. Bei bekanntem Kamerawinkel (α), Messabstand (grün), Reiterabstand (gelb) können nach dem Triangulationsprinzip genaue 3-D-Koordinaten für Bildpunkte im Messvolumen bestimmt werden. Durch mehrere Aufnahmen der Kalibrierplatte (rechts) in verschiedenen Positionen und Orientierungen wird das System kalibriert.

Es wurden E-Moduln mittels 3-Punkt-Biegeprüfung nach DIN EN 993-6 unter Verwendung von DIC (Digital Image Correlation) ermittelt. Dieser ist nach diesem Verfahren aus dem Verhältnis von Spannung und Dehnung bzw. der Verformung bestimmbar. Neben den auftretenden Prüfkräften muss dazu während des Versuchs die Durchbiegung der Probe gemessen werden. Der Traversenweg der Prüfmaschine unterliegt dabei erfahrungsgemäß meist signifikanten Messungenauigkeiten, da Setzeffekte und Anlagensteifigkeit hier mit in die Messdaten eingehen. Daher repräsentiert der Messschrieb der Prüfmaschine nicht das elastische Verhalten des Prüfkörpers. Für eine möglichst genaue Ermittlung des E-Moduls wurden daher die Wegänderung bzw. Durchbiegung direkt an der Probe gemessen. Hierzu wurde eine optische Dehnungsmessung hinzugezogen. Diese wurde ebenfalls zu Bestimmung der Anlagensteifigkeit, also der Differenz der Wegmessung zwischen Probe und Anlage, verwendet. Das optische Mess-System erfordert einen hohen Kontrast, etwa 50% schwarz und 50% weiße Bereiche sowie Musterpunkte mit einer Größe von 3-5 Pixel. Dies wurde durch die verwendeten feuerfesten Materialien gewährleistet.

E-Modulmessung mittels DIC bei Raumtemperatur

Für die optische Messung des statischen E-Moduls wurde das System ARAMIS Adjustable 3D 12M der Firma GOM Metrology mit der Auswertesoftware Correlate Pro verwendet. Die Grundlagen der digitalen Bildkorrelation sind in Kapitel 3.6 beschrieben. Der Messaufbau ist in Abbildung 10 dargestellt.

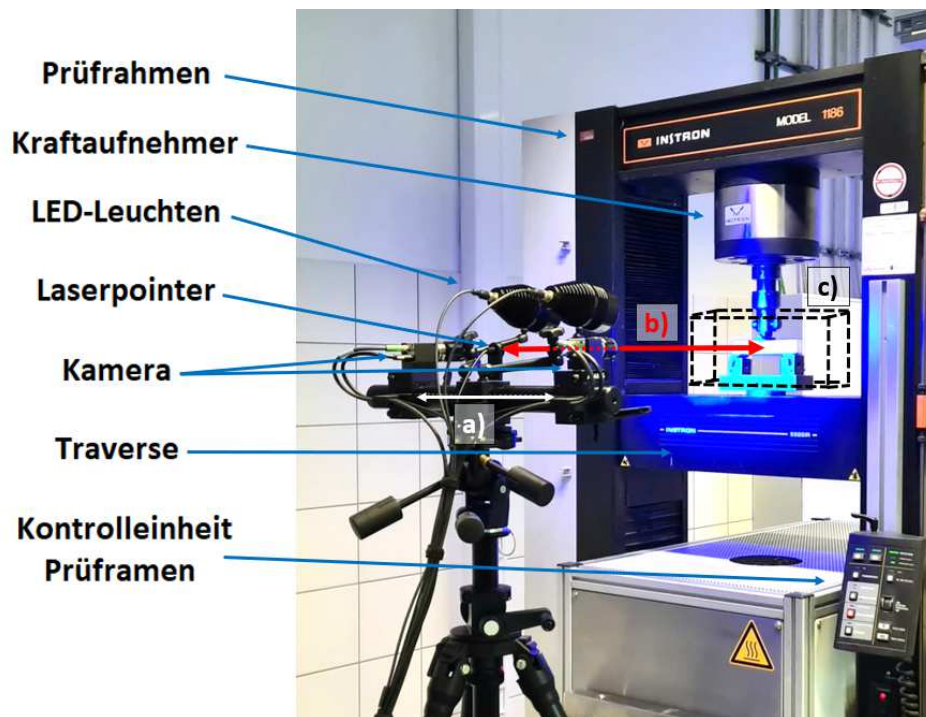


Abbildung 10: Versuchsaufbau der statischen E-Modul-Messung bei Raumtemperatur unter Verwendung des Systems ARAMIS 12M der Firma GOM Metrology. Gekennzeichnet sind a) der Reiterabstand, b) der Messestand und c) das Messvolumen.

Für eine genaue Messung ist die richtige Positionierung der Kamera zu Beginn der Messung von entscheidender Bedeutung. Die Ausrichtung der Kamera erfolgte mit Hilfe eines Lasers, der sich zwischen den beiden Kameras befindet. Der Messabstand betrug 697 mm, der Reiterabstand 585 mm und der Kamerawinkel 25° . Daraus ergab sich ein Messvolumen von 270 mm x 150 mm mit einer Tiefe von ca. 50 mm. Nach der Positionierung der Kamera wurden Fokus, Belichtung und Blende eingestellt. Belichtung und Blende haben einen direkten Einfluss auf die Helligkeit und Tiefenschärfe des aufgenommenen Bildes. Die Tiefenschärfe ist von besonderer Bedeutung, da sie die die Tiefe und damit die Größe des Messvolumens beeinflusst. Zur korrekten Ausrichtung der LED-Leuchten wurde die Falschfarbendarstellung verwendet (Abb. 11a). Diese liefert eine visuelle Darstellung der Helligkeitsverteilung im Bild und ermöglicht so eine optimale Einstellung der LED-Leuchten. Eine gute Ausleuchtung des Messobjekts ermöglicht die Verwendung einer kleineren Blendenzahl, was wiederum zu einer größeren Tiefenschärfe führt, wie in Abbildung 11b dargestellt.

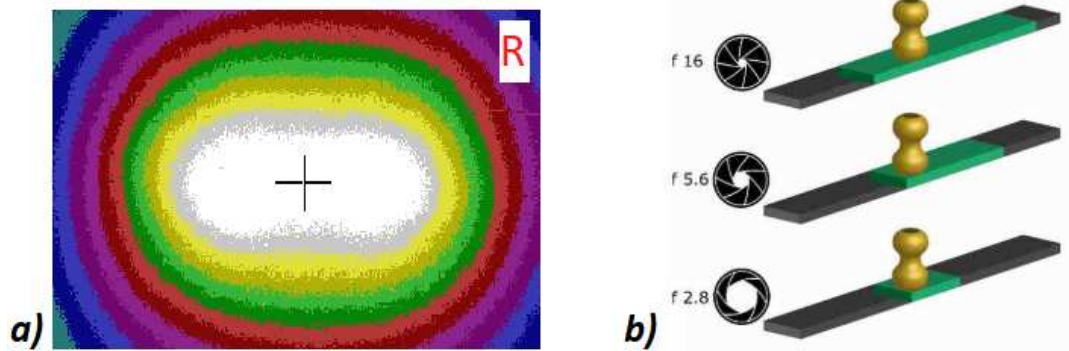


Abbildung 11: (a) Falschfarbendarstellung rechten Kamerabildes zur optimalen Einstellung der LED-Leuchten und (b) Darstellung des Zusammenhangs zwischen Blendenzahl und Tiefenschärfe.

Für diese Arbeit wurden alle Proben vorbereitet, indem ein stochastisches Muster mit feinen Lacksprenkeln durch das Aufsprühen mit einer Sprühdose erzeugt wurde. Für die Versuche bei Raumtemperatur wurde ein Acryllack namens „Deco MAT“ von der Firma European Aerosols GmbH verwendet. Die optimale Gestaltung des Musters unterliegt gewissen Anforderungen. Der aufgetragene Lack muss sich der Verformung des Objekts anpassen und darf während der Bildaufnahme nicht abplatzen, deshalb wurde der Lack ungefähr 30 min vor der Prüfung aufgetragen. Da bei der Messung die Grauwerte als Signal ausgewertet werden ist ein hoher Kontrast erforderlich. Die Farbpunkte müssen sich deutlich und scharf vom Hintergrund abheben, wobei das Verhältnis von Schwarz zu Weiß etwa 50/50 betragen sollte. Die optimale Mustergröße hängt von der gewählten Facettengröße ab und muss groß genug sein, um von der Kamera vollständig aufgelöst zu werden, aber gleichzeitig fein genug, um ein detailliertes Raster von Berechnungsfacetten für die Auswertung zu liefern. Der Hersteller empfiehlt Muster mit drei bis vier Kontrastpunkten pro Facette, wobei die Musterpunkte eine Größe von 3 bis 5 Pixel haben, basierend auf einer Facettengröße von 19 Pixel. Die tatsächliche Größe der Musterpunkte hängt von der Größe des Messvolumens MV und der Auflösung der Kamera ab und kann mit einem Dreisatz gemäß Gleichung 1 berechnet werden. Im verwendeten Versuchsaufbau lag die optimale Größe der Musterpunkte bei circa 0,17 mm. Zusätzlich wird die Qualität der Muster direkt in der Software überprüft, wie in 12 dargestellt.

$$\text{Musterpunktgröße [mm]} = \frac{MV \text{ [mm]}}{\text{Bildbreite [Pixel]}} \times 3 - 5[\text{Pixel}] \quad \text{Gln. 1}$$

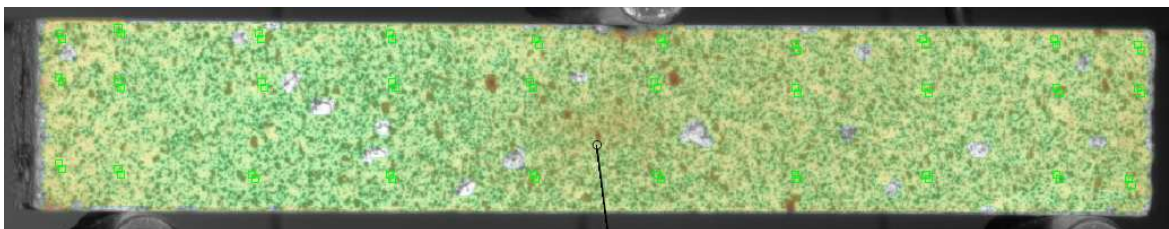


Abbildung 12: Überprüfung eines korrekten Musters durch den Einsatz der Correlate Pro Software

E-Modulmessung mittels DIC bei hohen Temperaturen

Für die Untersuchung des statischen E-Moduls unter Temperatureinfluss wurde eine 3-Punkt-Biegevorrichtung des Typs Instron Model 1186 mit Ofen verwendet. Der Aufbau des ARAMIS-Messsystems blieb weitgehend unverändert, wie in Abbildung 13 dargestellt.

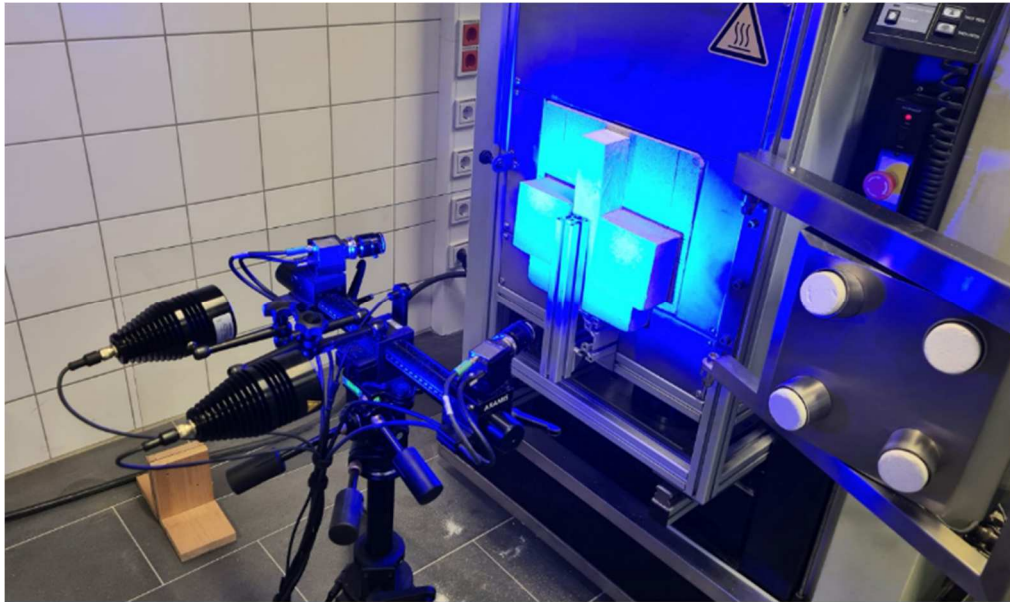


Abbildung 13: Messaufbau der DIC für Messungen in Ofen. Die Beleuchtungseinheiten sind aufgrund des begrenzten Beobachtungsfensters in einer Ebene mit den Kameras angeordnet.

Um sicherzustellen, dass das aufgebrachte Muster unter den hohen Temperaturen unverändert bleibt, wurde die Feuerraumbeschichtung "1590 ST" der ULFALUX Lackfabrik GmbH aufgebracht. Aufgrund ihrer Anordnung war es nicht möglich, die Beobachtungsöffnungen der Ofentür zu nutzen, weshalb die Ofentür während der gesamten Versuche geöffnet blieb. Um die Kamera vor der Hitze zu schützen, wurde eine mehrstufige Ofenzustellung angefertigt, die links in Abbildung 14 zu sehen ist.

Die innere Schicht der Ofenzustellung wurde aus Schamottesteinen so hergestellt, dass nur der für die Messungen notwendige Bereich als Beobachtungsfenster ausgespart wurde. Dahinter wurden zwei temperaturbeständige Glasscheiben der Marke Neoceram® von Nippon Electric Glass Co., Ltd. in einen Rahmen aus Feuerleichtsteinen eingefasst. Anschließend wurde eine Vermiculite-Platte angefertigt, die den Ofen bündig abschließt und wiederum nur den für die Messung erforderlichen Bereich ausspart. Während des Aufheizens wurde das Beobachtungsfenster mit weiteren Vermiculite-Blöcken abgedeckt. Die Perspektive der Kamera auf die Probe während der Messungen wird in Abbildung 14 rechts dargestellt.



Abbildung 14: Darstellung der drei Komponenten der Ofenzustellung (von links nach rechts: Vermiculite-Platte, Neoceram®-Glas im Feuerleichtstein-Rahmen, gefalzter Schamottestein). Der rechte Teil des Bildes zeigt die Kameraperspektive auf die Probe während der Messungen durch das Beobachtungsfenster.

Bestimmung des E-moduls mittels Biegelinienanalyse

In diesem Abschnitt wird die Bestimmung des E-Moduls anhand der Biegelinie beschrieben. Die Berechnung basiert auf den theoretischen Grundlagen der Balkentheorie, die zuvor erläutert wurden. Die experimentelle Biegelinie wurde mit dem System ARAMIS 12M kurz vor Erreichen der Bruchspannung ermittelt und als CVS-Datei exportiert. Abbildung 15 zeigt eine beispielhafte Biegelinie. Zur Bestimmung des E-Moduls wurden zwei Ansätze angewendet, die sich auf die Auswertung der Biegelinie stützen. Der erste Ansatz berechnet den E-Modul auf Grundlage der maximalen Durchbiegung. Beim zweiten Ansatz wurde ein Best-Fit-Verfahren angewendet, bei dem eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen der experimentellen Biegelinie und einer theoretischen Biegelinie erzielt wurde.

Zur Bestimmung der maximalen Durchbiegung f_{\max} wurde eine Linie zwischen den Endpunkten der experimentellen Biegelinie konstruiert. Der lotrechte Abstand von jedem Punkt dieser Linie zur experimentellen Biegelinie wurde berechnet und der größte dieser Abstände als maximale Durchbiegung definiert. Zusammen mit der aufgebrachten Kraft F , dem Auflagerabstand L_S und dem Flächenträgheitsmoment konnte der E-Modul gemäß Gleichung 2 berechnet werden [GER14].

$$E = \frac{F * L_S^3}{48 * f_{\max} * I} \quad \text{Gln. 2}$$

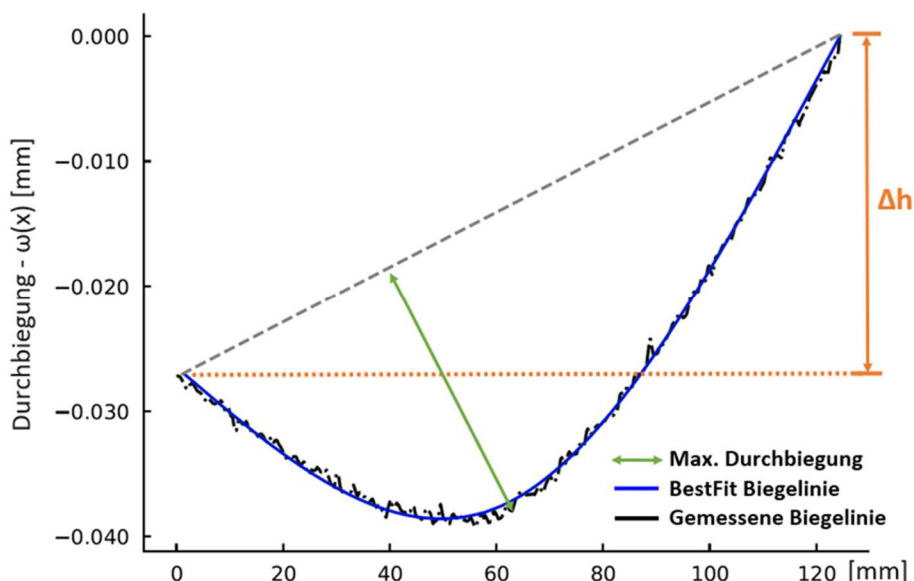


Abbildung 15: Die Darstellung zeigt eine mit dem ARAMIS-System erfasste Biegelinie (schwarz) im Vergleich zur theoretischen Biegelinie mit der größten Übereinstimmung (blau). Die Verschiebung der Auflager ist orange dargestellt, während die maximale Durchbiegung der Biegelinie grün hervorgehoben ist.

Das Flächenträgheitsmoment quantifiziert, in Abhängigkeit von der Probengeometrie, den Widerstand eines Körpers gegenüber Biegung oder Verformung. [32]. Für die quaderförmigen Probengeometrien lässt sich dies unter Berücksichtigung der Breite b und Höhe h nach Gleichung 3 berechnen [25].

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad \text{Gln. 3}$$

Zusätzlich wurde eine weitere Methode zur Bestimmung des E-Moduls angewendet, die auf einem algorithmischen Ansatz basiert. Dieser Ansatz zielt darauf ab, die Abweichungen zwischen der experimentell bestimmten und der theoretischen Biegelinie zu minimieren. Die theoretische Biegelinie $w(x)$ wird durch Gleichung 4 dargestellt.

$$w(x) = \begin{cases} -\frac{Fx(4x^2-3L^2)}{48LEI} + \frac{\Delta hx}{L}, & 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \\ \frac{Fx(x-L)(L^2-8Lx+4x^2)}{48LEI} + \frac{\Delta hx}{L}, & \frac{L}{2} < x \leq L \end{cases} \quad \text{Gln. 4}$$

Der Abstand der Auflager L_s betrug bei allen Messungen 125 mm. Das Flächenträgheitsmoment wurde für jeden Probekörper aus seiner Geometrie rechnerisch ermittelt (Gln. 13). Die zum Zeitpunkt der Messung aufgebrachte Kraft wurde ebenfalls bestimmt. Die verbleibenden Parameter in Gleichung 14 sind das Elastizitätsmodul E und die vertikale Verschiebung der Auflager Δh . Diese Verschiebung der Auflager während der Prüfung resultiert aus dem mechanischen Spiel des Prüfrahmens und wird bei der Berechnung der theoretische Biegelinie berücksichtigt, wie in Abbildung 19 dargestellt. Um eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen

der theoretischen und der gemessenen Biegelinie zu erreichen, wurden zunächst Anfangsschätzungen für den E-Modul E und die vertikale Verschiebung der Auflager Δh vorgenommen, die anschließend iterativ mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus angepasst wurden. Dabei wurde der quadratische Fehler zwischen den beiden Funktionen als Kriterium zur Beurteilung der Übereinstimmung herangezogen und minimiert. Der E-Modul, der die größte Übereinstimmung zwischen der gemessenen und der theoretischen Biegelinie ermöglicht, wird als der Messwert der Probe festgelegt.

Dynamische E-Modulmessung bei Hochtemperatur

In diesem Kapitel wird die Bestimmung des dynamischen E-Moduls unter Temperatureinfluss mittels Hochtemperatur-Resonanzfrequenz-Dämpfungsanalyse (HT-RFDA) beschrieben. Die Versuche wurden mit dem Prüfsystem HT1750 der Firma IMCE (Genk, Belgien) unter Verwendung der gleichen Sonelastic-RFDA-Software wie bei den Raumtemperaturversuchen durchgeführt. Der Messaufbau ist in Abbildung 16 dargestellt.

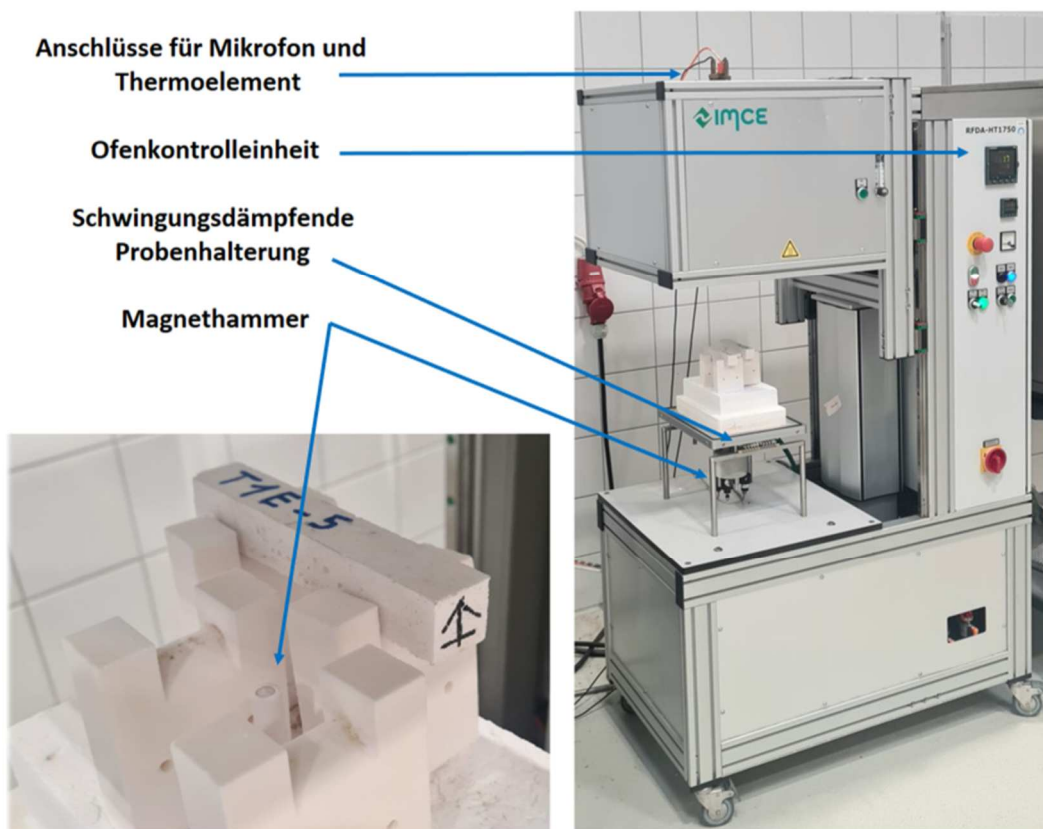


Abbildung 16: Versuchsaufbau für die dynamische E-Modul-Messung bei hohen Temperaturen (HT-RFDA) unter Verwendung des Prüfsystems HT1750. Die Messungen werden alle 30 Sekunden während eines programmierten Temperaturprogramms durchgeführt.

Das Verfahren und der Versuchsaufbau der HT-RFDA sind den Messungen bei Raumtemperatur sehr ähnlich. Es gibt einige Unterschiede zur Messung bei Raumtemperatur, insbesondere hinsichtlich der verwendeten Materialien der Apparatur. Die Auflager und der Hammer, die in direktem Kontakt mit der Probe stehen, bestehen aus temperaturbeständigem Aluminiumoxid (Al_2O_3). Zusätzlich wurde ein Aluminiumoxidrohr über der Probe installiert, um die akustischen Signale zum Mikrofon außerhalb des Ofens zu leiten. Die Proben wurden, analog zur Messung bei Raumtemperatur, auf den Auflagern positioniert und in regelmäßigen Abständen von 30 Sekunden gemessen. Sowohl der Hammer als auch das Mikrofon befanden sich an denselben Stellen wie bei der Messung bei Raumtemperatur. Der Versuchsaufbau war doppelt ausgelegt, sodass stets zwei Proben gleichzeitig gemessen wurden. Nach der Platzierung der Proben wurde das Ofenprogramm gestartet. Der thermische Verlauf der Messungen ist in Abbildung 17 dargestellt. Dabei wurde die Temperatur mit einer Rate von 5K/min bis auf 1400°C erhöht, dann für eine Stunde auf diesem Niveau gehalten und schließlich mit einer Rate von 5K/min wieder abgekühlt.

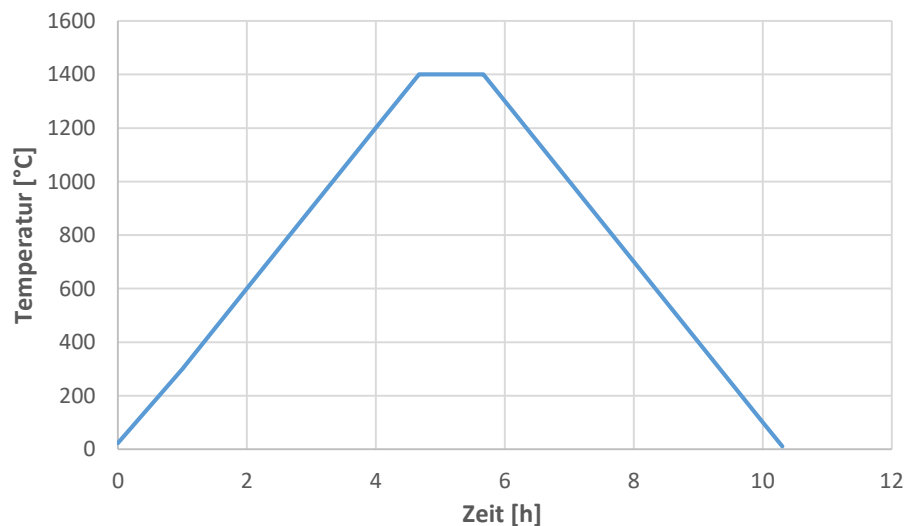


Abbildung 17: Temperaturprogramm der HT-RFDA-Messung, die einzelnen Messungen erfolgen alle 30 Sekunden.

Ein weiterer Aspekt der Messung ist der Einfluss der Wärmeausdehnung auf die Messergebnisse. Da die thermische Ausdehnung der Probe zu einer Volumenvergrößerung führt, stimmen die Abmessungen der Probe bei hohen Temperaturen nicht mehr mit den ursprünglichen Abmessungen überein. Diese sind jedoch für die Berechnung des E-Moduls unerlässlich. In Übereinstimmung mit ASTM C 1259-08 korrigiert die Software den E-Modul mit folgender Gleichung 5 [33]:

$$E_T = E_{RT} + \left(\frac{f_T}{f_{RT}}\right)^2 * \left(\frac{1}{1 + \alpha * \Delta T}\right) \quad \text{Gln. 5}$$

Dabei steht E_T für das E-Modul bei der Temperatur T in GPa, E_{RT} für das E-Modul bei Raumtemperatur, f_T für die Resonanzfrequenz bei der Temperatur T, f_{RT} für die Resonanzfrequenz bei Raumtemperatur, α für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten und ΔT für die Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur und Hochtemperatur. Für die Berechnungen wurde der Mittelwert des in der Literatur angegebenen thermischen Ausdehnungskoeffizienten für Korund im Bereich von $6,5 - 8,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ verwendet [34]. Der Einfluss dieser Korrektur ist jedoch gering, da die Abweichung selbst bei 1400°C weniger als 1% beträgt.

Statische E-Modulmessung mittels korrigierter Wegdaten

Im Rahmen der experimentellen Durchführung wurde das in DIN 843-2 festgelegte Verfahren zur Bestimmung des E-Moduls angewendet, wobei die scheinbare Verschiebung der Prüfmaschine berücksichtigt wurde. Die scheinbare Verschiebung bezeichnet gemessene Verschiebung die unabhängig von der tatsächlichen Bewegung des Prüfkörpers auftritt. Gorny beschreibt in seiner Dissertation diese Messabweichung als Resultat verschiedener Faktoren wie Durchbiegung der Traverse, Einspann- und Setzeffekte sowie Messfehler des Wegaufnehmers [GOR13]. Um die tatsächliche Verschiebung des Probekörpers zu bestimmen, wurde die zuerst die scheinbare Verschiebung ermittelt und von den gemessenen Werten abgezogen. Zur Bestimmung der scheinbaren Verschiebung wurde ein überdimensionaler Kalibrierstab geprüft, der aufgrund seiner Größe und Geometrie als praktisch unbiegsam angesehen werden kann. Die während dieser Prüfung erfasste Verschiebung entspricht der scheinbaren Verschiebung der Prüfmaschine. Gemäß den Vorgaben der DIN-Norm wurden die Messungen des überdimensionierten Kalibrierstabs in mehreren Zyklen durchgeführt. Nach der Kalibrierung wurden die Probenkörper geprüft. Die während dieser Prüfungen gemessenen Verschiebungen enthielten sowohl die tatsächliche als auch scheinbare Verschiebung des Prüfkörpers bzw. Prüfmaschine. Daher wurde eine Korrektur der Messwerte vorgenommen, indem die scheinbare Verschiebung von den gemessenen Werten abgezogen wurde. Der E-Modul wurde aus der tatsächlichen Verschiebung in einem definierten Spannungsbereich von 10 bis 20 MPa entsprechend der Norm berechnet. Nach dem gleichen Prinzip wurden auch die Temperaturversuche durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde eine Vorrichtung verwendet, die eine Dreipunktbiegung im Ofen ermöglichte. Die Auflager und der Stempel sind aus Al_2O_3 gefertigt. Die Proben wurden zunächst auf zwei Al_2O_3 -Rohren positioniert, die als Lager dienen. Durch zusätzliche Al_2O_3 -Rohre konnten die Proben exakt positioniert und nach der Messung sicher entfernt werden. Der Stempel war über einen Al_2O_3 -Stab mit einem Kraftaufnehmer außerhalb des Ofens und dem Querbalken verbunden. Diese Konstruktion ermöglichte die gleichzeitige Messung von Kraft und Weg. Aufgrund der Abmessungen des Ofens wurde der dicke Kalibrierstab in seiner Größe angepasst.

Erzielte Ergebnisse:

E-Modul Bestimmung mit korrigierten Wegdaten bei Raumtemperatur

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse des E-Moduls unter Verwendung der korrigierten Verschiebungsdaten dargestellt. Abbildung 18 zeigt die Messung der scheinbaren Verschiebung über sechs Zyklen hinweg.

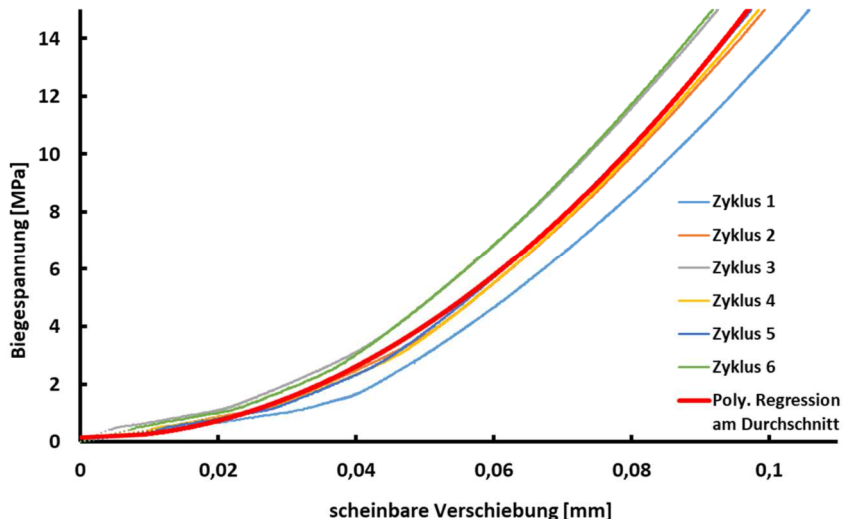


Abbildung 18: Darstellung der gemittelten scheinbaren Verschiebung der Prüfmaschine, gewonnen aus sechs Einzelmessungen. Die Messwerte wurden geglättet, indem eine polynomiale Regression durchgeführt wurde.

Zur Verbesserung der Messgenauigkeit wurden die Zyklen erst gemittelt und daraufhin mittels polynomialer Regression geglättet, um die Korrekturdaten zu bereinigen. Abbildung 19 zeigt die gemessene Verschiebung der Prüfmaschine für eine repräsentative Probe, die korrigierten Daten und die daraus resultierende Verschiebungskurve. Der für die Berechnung des E-Moduls ausgewählte Lastbereich ist ebenfalls gekennzeichnet.

Zur Visualisierung der Rissausbreitung und des Verformungs-Verlaufs der Probe beim Drei-Punkt-Biegeversuch erfolgt die Darstellung der Dehnung der Probe in horizontaler x-Richtung. Es werden etwa 100 Frames in 2 Sekunden von dem Mess-System erfasst. Die Auswertung der Biegeversuche erfolgt dann mit Hilfe der Biegelinienmethode. Zur Ermittlung des E-Moduls mittels Biegelinienmodells wurden zwei unterschiedliche Materialien verwendet. Zum einen wurde an einem metallischen Quader aus Aluminium die Durchbiegung erfasst und gemäß der Biegelinie der E-Modul berechnet. Zum anderen wurde das auch für die DE-Bestimmungen verwendeten Feuerfestmaterialien getestet. In Abbildung 20 und 21 sind beispielhaft die Zeit-Weg Messungen sowie die Durchbiegungen der metallischen Aluminiumprobe sowie der feuerfesten Bauxitprobe wiedergegeben. Die ermittelten Werte für die Durchbiegungen sind stark unterschiedlich, so dass die Durchbiegung der Aluminiumprobe vierfach so groß ist wie die der feuerfesten Bauxitprobe.

Zu berücksichtigen gilt hier jedoch auch das unterschiedliche Verformungsverhalten und die entstehenden Rissbildungen in den Feuerfestproben. Die ermittelten Werte für Biegekraft, Durchbiegung und E-Modul sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

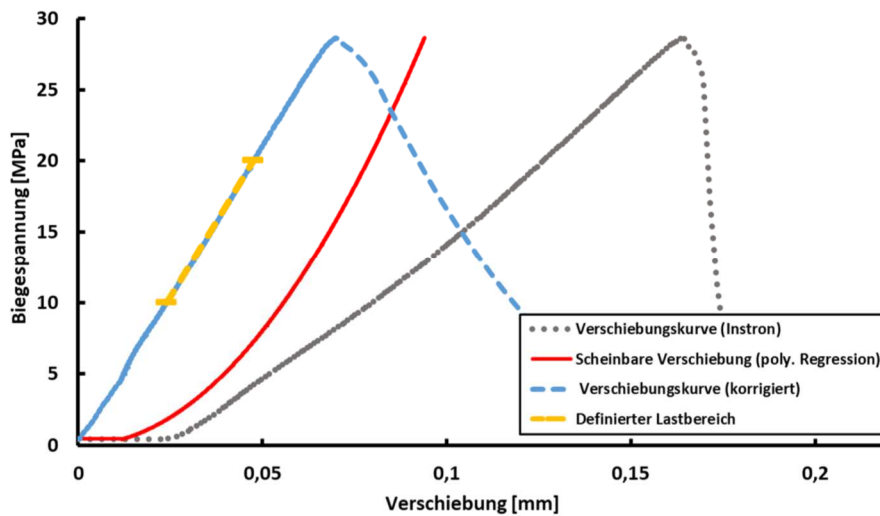


Abbildung19: Die grau dargestellten Werte repräsentieren die durch den Schrittmotor gemessenen Verschiebungen, welche um die scheinbare Verschiebung der Prüfmaschine korrigiert wurden. Der in Gelb markierte Bereich kennzeichnet den Lastbereich, der zur Berechnung des E-Moduls herangezogen wurde

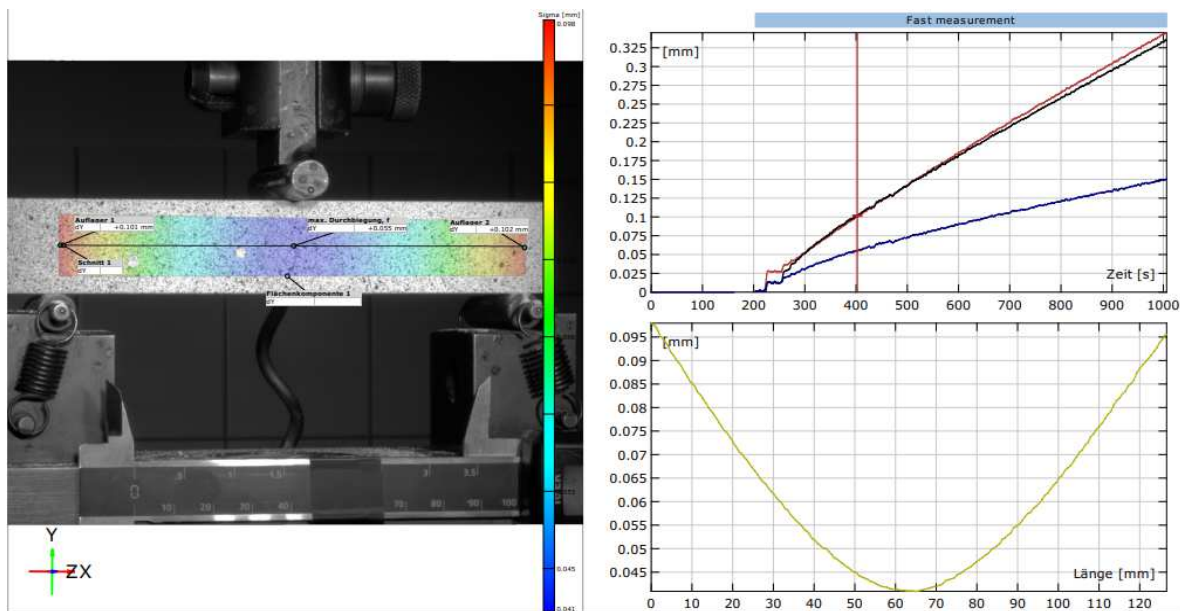


Abbildung 20: Zeitliche Verformung einer Aluminiumprobe im Drei-Punkt-Biegeversuch und ermittelte Durchbiegung

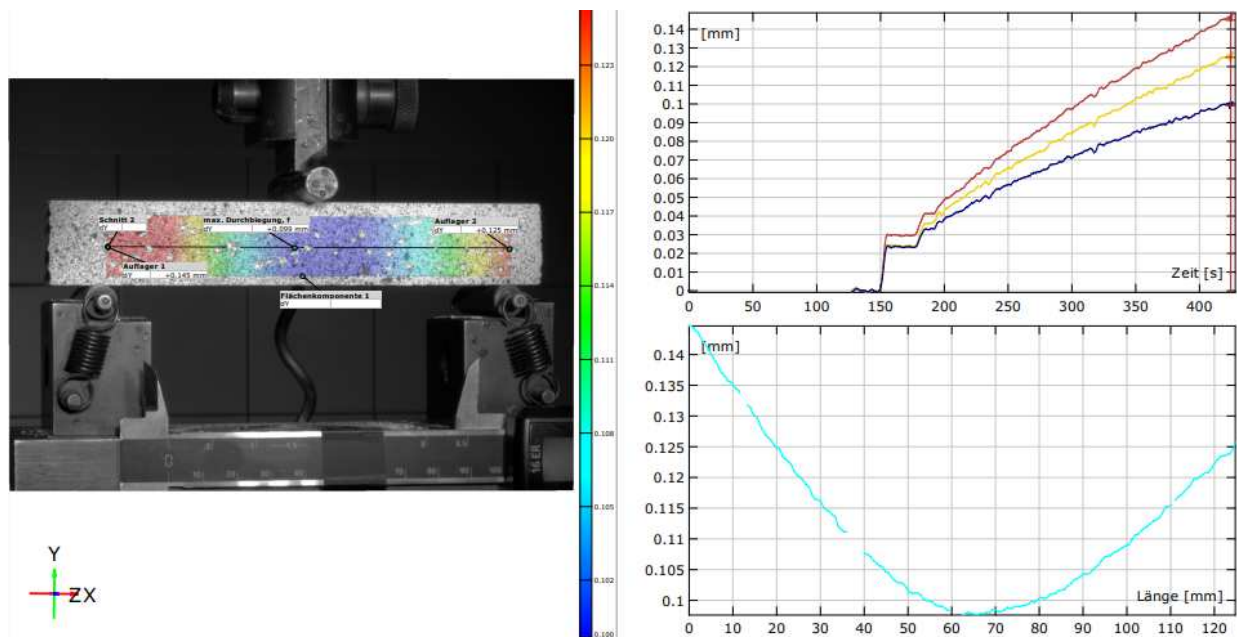


Abbildung 21: Zeitliche Verformung einer feuerfesten Bauxitstein-Probe im Drei-Punkt-Biegeversuch und ermittelte Durchbiegung

Tabelle 1: Biegekraft, Durchbiegung und E-Modul, ermittelt durch Drei-Punkt-Biegung und DIC

Material	Durchbiegung [mm]	Biegekraft [MPa]	E-Modul [GPa]
Aluminium	0,172	9879	70,7
Bauxit	0,042	1623	47,5

Biegelinienanalyse bei Raumtemperatur

Zur Verifizierung der angewendeten Methoden wurden zunächst Referenzmessungen an Aluminium und Stahl durchgeführt, da die E-Module dieser Materialien aus der Literatur bekannt sind. Bei der Aluminiumprobe wurde auf Basis der maximalen Durchbiegung ein E-Modul von 73 GPa und auf Basis der Biegelinie ein E-Modul von 70 GPa ermittelt. Beide Werte zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem in der Literatur angegebenen E-Modul von 70 GPa für Aluminium [35]. Für die Stahlprobe ergab die Messung der maximalen Durchbiegung einen Wert von 200 GPa und die Biegelinienanalyse einen Wert von 209 GPa. Der auf Basis der maximalen Durchbiegung ermittelte Wert liegt etwas unter dem in der Literatur verzeichneten E-Modul von 210 GPa für Stahl [35]. Dabei weichen die mittels Biegelinienanalyse ermittelten Werte lediglich etwa 1% von den Literaturangaben ab. Zur weiteren Auswertung wurden 30 identische Proben untersucht. Die Bewertung anhand der maximalen Durchbiegung ergab einen Mittelwert von 92 GPa mit einer relativen Standardabweichung von 14,2%. Bei der Bewertung anhand der Biegelinienanalyse lag der Mittelwert aller Messungen bei 102 GPa und die Standardabweichung bei 10,6 %. Es ist zu bemerken, dass, ähnlich wie bei der Referenzprobe aus Stahl, die Messergebnisse der maximalen Durchbiegung tendenziell niedriger ausfallen und eine höhere Streuung aufweisen. Die Biegelinien der Referenzproben sowie von vier repräsentativen Messungen sind in Abbildung 22 dargestellt.

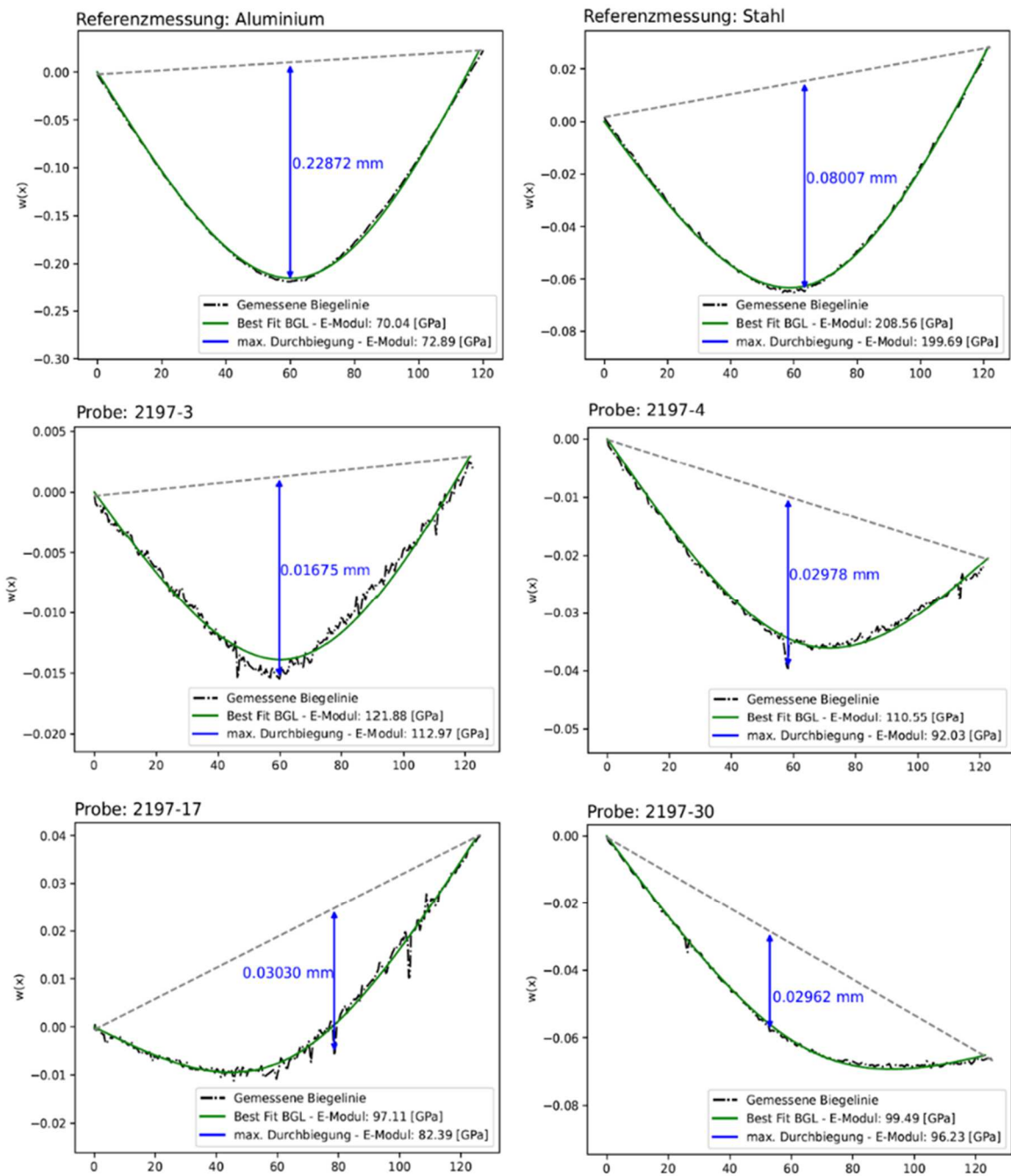


Abbildung 22: Diese Abbildung zeigt die Biegelinien der Referenzproben aus Aluminium und Stahl, die bei einer Belastung von 150 MPa aufgezeichnet wurden, sowie die Biegelinien von vier repräsentativen Proben, die jeweils kurz vor Erreichen der Bruchspannung aufgenommen wurden.

Biegelinienanalyse bei hohen Temperaturen

In diesem Abschnitt wird die Biegelinienanalyse bei erhöhten Temperaturen behandelt. Die Messungen wurden bei den Temperaturstufen 20°C, 300°C und 600°C durchgeführt, wobei in jedem Fall eine Belastung von 12,5 MPa angewendet wurde. Es ist festzustellen, dass mit steigender Temperatur die Qualität der Messergebnisse rapide abnimmt, wodurch keine Messungen über 600°C möglich waren. Abbildung 23 zeigt jeweils zwei repräsentative Messungen für jede der genannten Temperaturstufen.

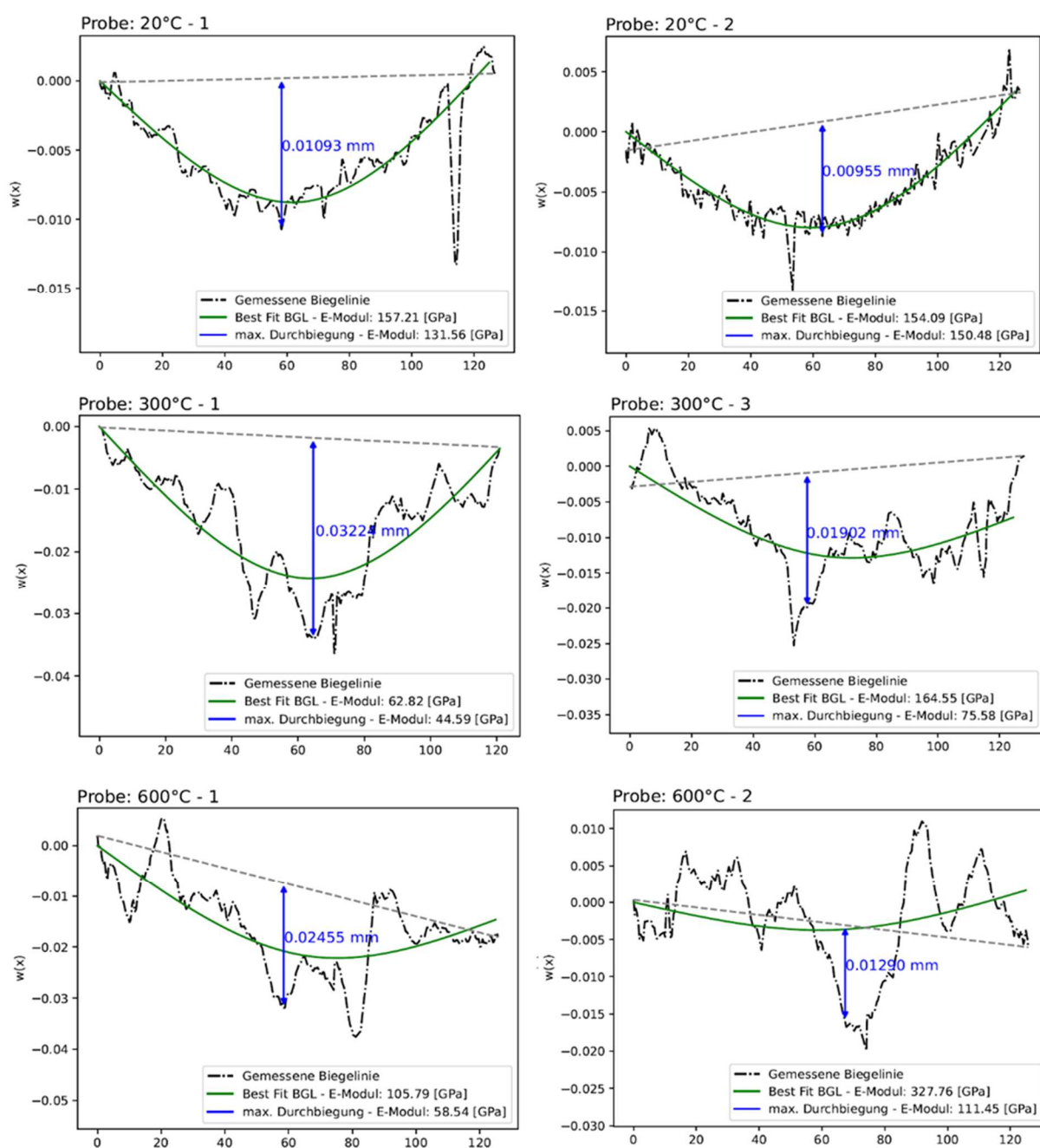


Abbildung 23: Repräsentative Biegelinienanalysen bei 20°C, 300°C und 600°C. Jede Messung erfolgte unter einer Belastung von 12,5 MPa. Die Qualität der Ergebnisse nimmt mit steigender Temperatur ab, was Messungen über 600°C unmöglich macht.

Dynamische E-Modul Bestimmung bei Hochtemperatur

In Abbildung 24 und 25 sind die temperaturabhängigen Verläufe des E-Moduls für einen Feuerleichtstein der ASTM Gruppe 34 und einen feuerfesten Bauxitstein dargestellt, die mittels RFDA bestimmt wurden. Bis 1150°C gibt es für den FL-Stein einen konstanten Verlauf des E-Moduls, der ab dieser Temperatur bis zur maximalen Temperatur von 1400°C von 12 GPa auf ca. 8 GPa abfällt. Beim Abkühlen der Probe steigen die Werte wieder an und erreichen mit ca. 13.5 GPa einen höheren Wert als zu Beginn der Messungen.

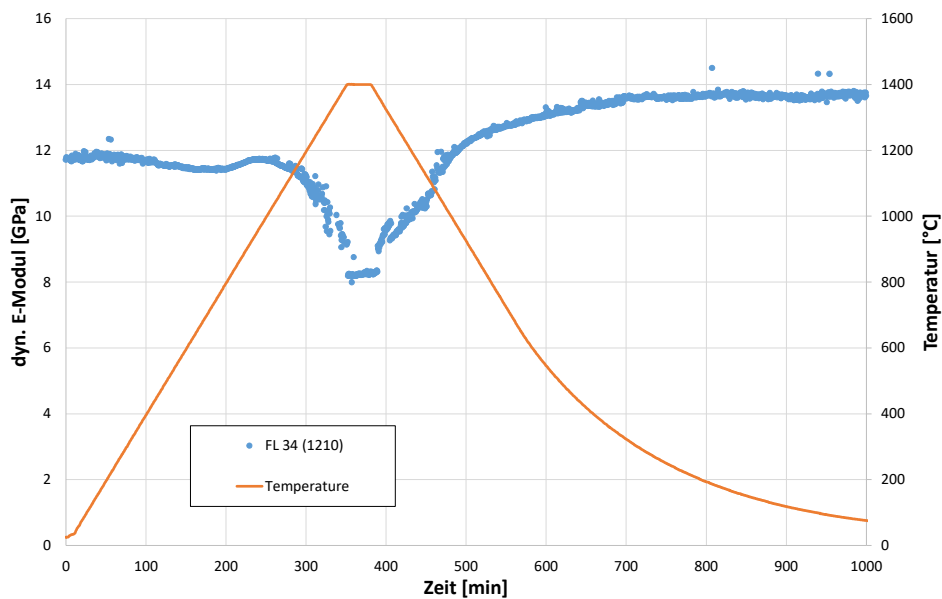


Abbildung 24: E-Modul-Bestimmung bis 1400°C mittels RFDA des Feuerleichtsteins der Gruppe 34

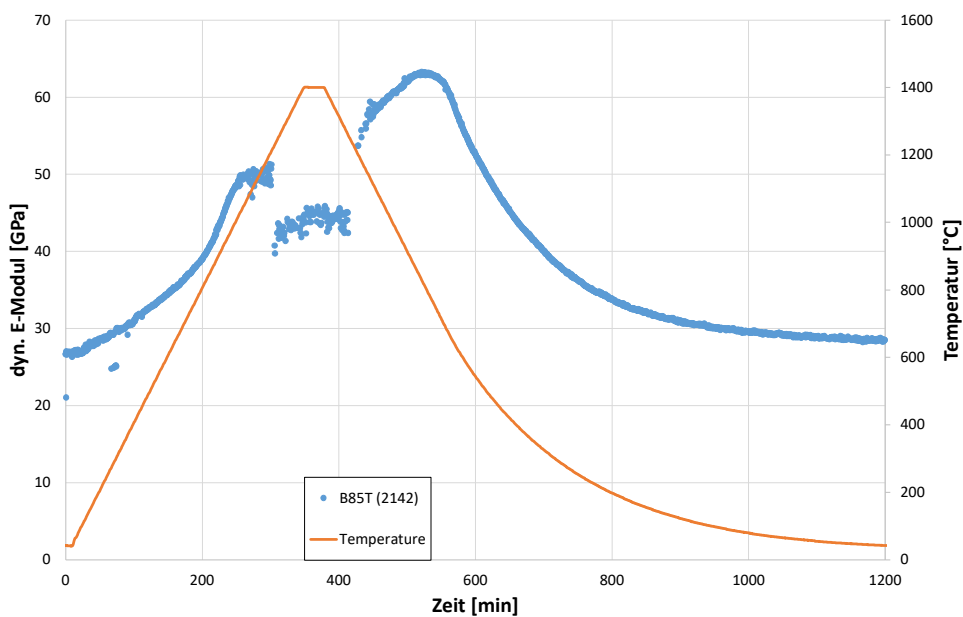


Abbildung 25: E-Modul-Bestimmung bis 1400°C mittels RFDA des Bauxitstein der Sorte B85T

In der Aufheizphase des feuerfesten Bauxitsteins steigt der E-Modul von 25 GPa auf 50 GPa bei 1150°C an. Mineralphasenumwandlungen durch Mullitbildung beeinflussen die Messungen, so dass nach einem E-Modul Minimum bei 1400°C der Wert bei Abkühlung zunächst auf 60 GPa ansteigt, um dann mit weiterer Abkühlung kontinuierlich zu fallen. Am Ende der Messung liegt der E-Modul auf gleichem Niveau wie zu Beginn.

Thermische Dehnung und Ermittlung des E-Moduls

Als genormtes Verfahren zur Bestimmung der thermischen Dehnung wurde die Methode zur Bestimmung des Druckerweichens (Refractoriness under load /RUL) gewählt. Zur Bestimmung der thermischen Dehnung werden zunächst Druckerweichungsversuche ohne Last nach DIN 993-19 an den zu untersuchenden Feuerfest- und Fugen-Materialien durchgeführt. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 26 zu finden.

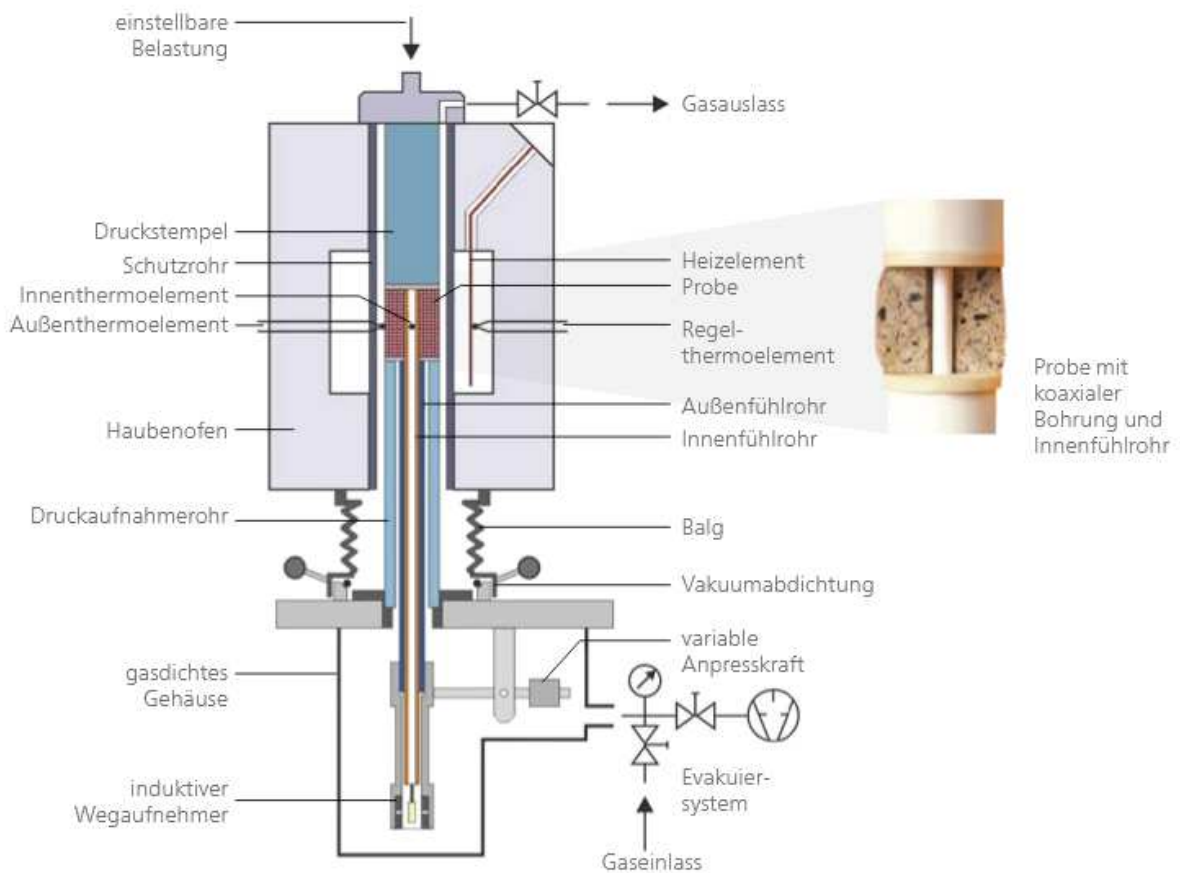


Abbildung 26: Schema der Druckerweichungs-Prüfung (RUL)

Anschließend werden an den einzelnen Materialien Druckerweichungsversuche nach DIN EN ISO 1893 unter der vorgegebenen Standardlast von 0,2 MPa durchgeführt. Zusätzlich wurden Versuche mit höheren Lasten bis 1,3 MPa durchgeführt. Welche Lasten dabei die besten Ergebnisse erzielen, ist im Rahmen der Versuche zu erproben. Mit bekannter Wärmedehnung

kann nun anhand des Temperatur-Weg-Schriebs bei bekannter Last für jede Temperatur eine elastische Gerade aus den Versuchen mit und ohne Last konstruiert werden. Bei der einachsigen Belastung stellt die Steigung der Geraden den E-Modul (E_1) bei T_1 der geprüften Probe dar. Dieses Vorgehen ist schematisch in Abbildung 27 erläutert.

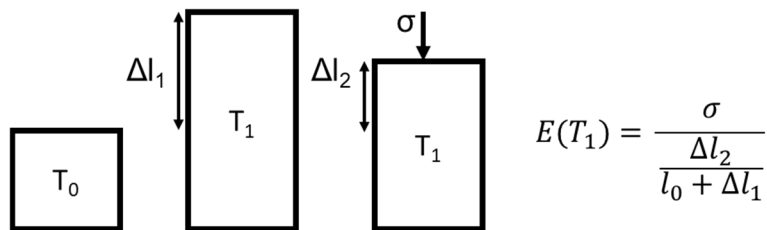


Abbildung 27: Schematische Darstellung der E-Modul-Ermittlung mittels Druckerweichen

Zunächst wurden Temperatur-Dehnungsdaten von RUL-Versuchen an Feuerleichtsteinen der ASTM Gruppe 34 mit 99% Al_2O_3 gemessen und dokumentiert. Sie sind in Abbildung 28 dargestellt. Wie zu erwarten resultiert mit steigender Spannung eine abnehmende Dehnrates der Feuerleichtsteinproben.

Wie in Versuchen im früheren Projektzeitraum bereits gezeigt, weisen die einzelnen Kurven eine frühere Abweichung vom linear-elastischen Verhalten auf und Erreichen daher mit zunehmender Spannung den Druckentlastungspunkt früher. Es ist auch zu erkennen, dass die Kurven bei gleicher Temperaturänderung mit zunehmender Spannung eine geringere Dehnung erfahren, was auf die höhere elastische Stauchung durch die höhere Druckspannung zurückzuführen ist. Da die Kurve des Versuchs mit der höchsten Spannung (1,3 MPa) bereits bei etwa 1100 °C vom linear-elastischen Verhalten abweicht, wurden die Versuche nur bis zu einer Temperatur von 1000 °C ausgewertet. Die experimentellen Daten des Versuchs bei 0,01 MPa Belastung wurden zur Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten des Materials verwendet.

Bei den Versuchen wurden aus den gemessenen Daten elastische Geraden für konstante Temperaturen im Bereich von 200°C bis 1000°C in Schritten von 200°C konstruiert. Das Ergebnis dieser Konstruktion ist für alle Messungen im Temperaturbereich von 200 bis 1000°C in Abbildung 29 dargestellt. Aus dem Verlauf dieser Kurven wurden dann die E-Modulwerte für das Material im angegebenen Temperaturbereich ermittelt (vgl. Tabelle 2). Diese Werte für den statischen E-Modul können nun mit den erzielten Ergebnissen aus der Bestimmung des dynamischen E-Moduls nach ASTM C 1548-02 mittels Resonanzfrequenz-Dämpfungs-Analyse (RFDA) verglichen werden.

Wie in Tabelle 2 gezeigt, liegen die so ermittelten Werte des statischen E-Moduls im Bereich von 4,7 GPa bei 200°C bis zu 1,9 GPa bei 1000°C. Dies ist ein deutlicher realistischerer Wert als bei den bisherigen Annahmen im Projektverlauf. Die Werte des dynamischen E-Moduls zeigen die erwartbaren höheren Werte zwischen 11,8 GPa bei 200°C bis zu 12,5 GPa bei 1000°C.

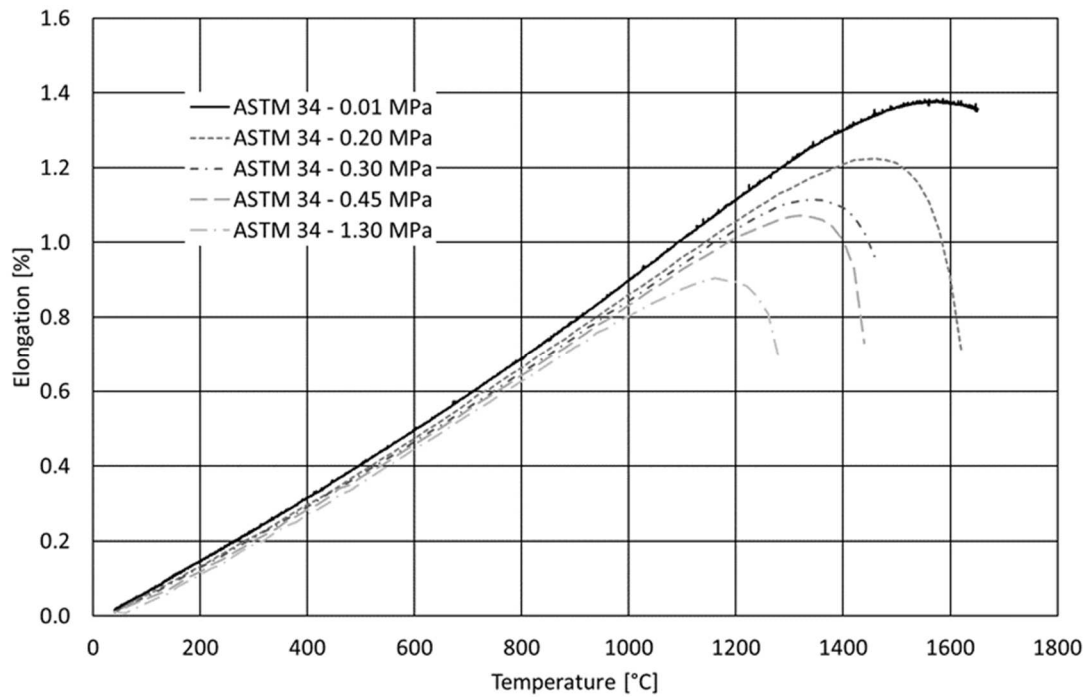


Abbildung 28: Temperatur-Dehnungsmessungen aus RUL-Tests unter verschiedenen Belastungen für Feuerleichtseine der ASTM Gruppe 34

Aus den Messergebnissen des Feuerleichtsteins wurden daher für verschiedene Temperaturen exemplarisch elastische Geraden konstruiert anhand derer der jeweilige E-Modul für die Temperaturen ermittelt wurde. Möglicherweise zeigt auch der Feuerleichtstein für geringe Spannungen noch nicht das tatsächliche elastische Verhalten (Vergleich Abbildung 29).

Tabelle 2: E-Modul Bestimmungen aus den für verschiedene Temperaturen konstruierten Geraden aus Abb. 27 (RUL) sowie der RFDA Methode

Temperatur [°C]	E-Modul RUL [GPa]	E-Modul RFDA [GPa]
200	4,7	11,8
400	4,3	11,4
600	3,9	11,6
800	3,0	11,6
1000	1,9	12,5

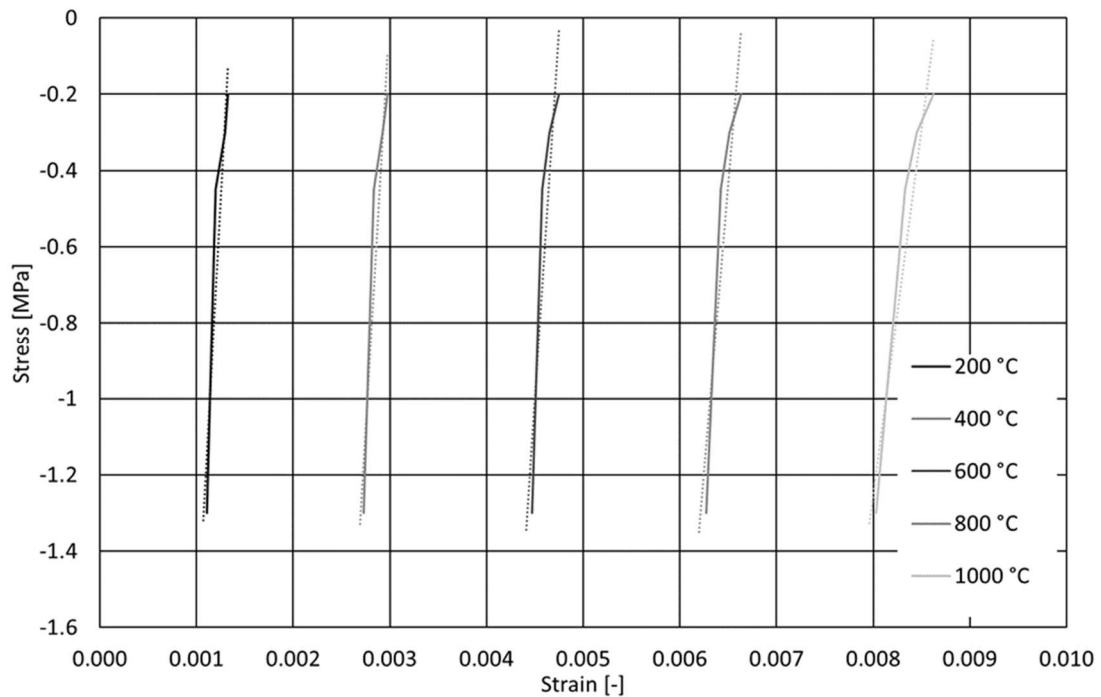


Abbildung 29: Aus Druckerweichungsversuchen erstellte elastische Geraden für verschiedene Temperaturen

Im Projektzeitraum fand ein Umzug der Forschungsstelle 1 (GHI) in neue Räumlichkeiten statt, die eine Neukalibrierung der RUL-Messapparatur erforderlich machte. Es wurden somit für die Feuerleuchtsteine der ASTM Gruppe 34 alle Messungen zur Vergleichbarkeit wiederholt. Die Belastung wurde von 0,01 MPa auf bis 1,3 MPa gesteigert. Die Ergebnisse dieser Wiederholungsmessungen sind in Abb. 30 wiedergegeben. Die daraus konstruierten Spannungs-Dehnungskurven sind in Abb. 31 wiedergegeben. Die ermittelten Werte für die unterschiedlichen E-Modul-Bestimmungen finden sich in Tabelle 3.

Tabelle 3: E-Modul Bestimmungen aus den für verschiedene Temperaturen konstruierten Geraden aus Abb. 29 (RUL) sowie der RFDA Methode

Temperatur [°C]	E-Modul RUL (neu) [GPa]	E-Modul RUL (alt) [GPa]	E-Modul RFDA [GPa]
200	4,5	4,7	11,8
400	2,6	4,3	11,4
600	2,3	3,9	11,6
800	1,9	3,0	11,6
1000	1,1	1,9	12,5

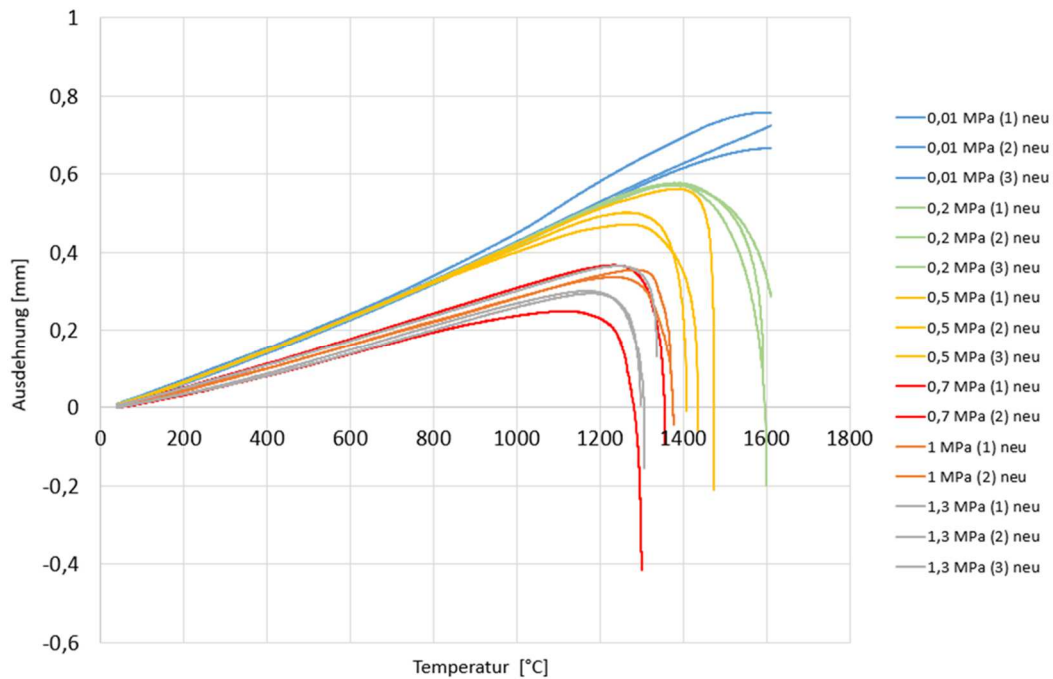


Abbildung 30: Temperatur-Dehnungsmessungen aus RUL-Tests unter verschiedenen Belastungen für Feuerleichtsteine der ASTM Gruppe 34 (Mehrfach Neubestimmungen nach Laborumzug und Neukalibrierung)

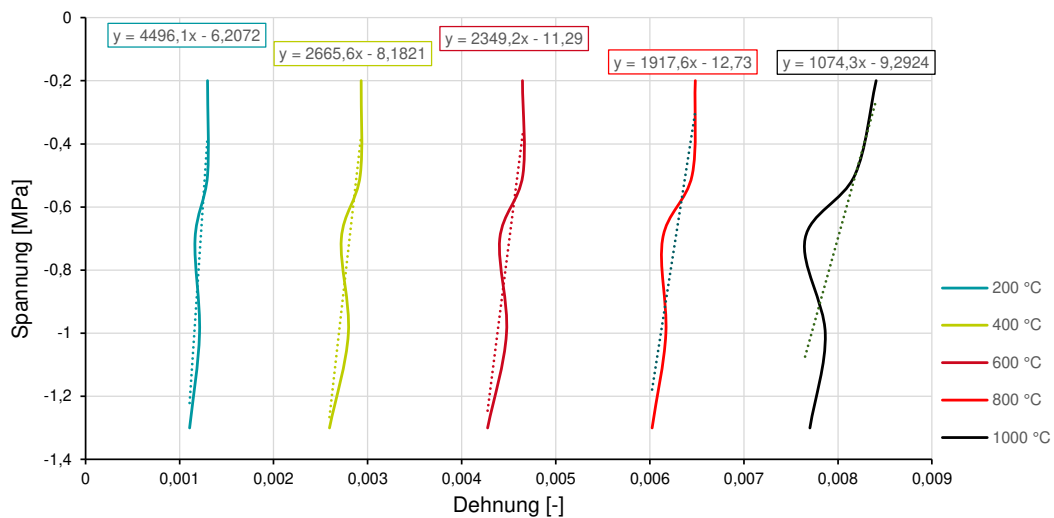


Abbildung 31: Aus Druckerweichungsversuchen der Feuerleichtsteine (aus Abb. 28) erstellte elastische Geraden für verschiedene Temperaturen

Als weiteres Referenzmaterial für die Evaluierung des E-Moduls aus Messdaten der Druckerweichungsversuche dient gepresstes Feuerfestmaterial auf Bauxitbasis. Im Vergleich mit dem Feuerleichtsteinmaterial weist es eine deutlich höhere Dichte sowie Festigkeit auf und wird für thermisch und v.a. mechanisch höher belastete Feuerfest-Konstruktionen verwendet. Zunächst wurden in diesem Projektzeitraum zylindrische Bauxit-Vollproben für die Bestimmungen verwendet. Die gesamten RUL-Versuche sind mit Messungen bei Belastungen zwischen 0,7 MPa und 1,3 MPa ebenfalls bis zu hohen Drücken durchgeführt worden. A priori sei bemerkt, dass

derartige Feuerfest-Materialien bezüglich der mechanischen Belastbarkeit mikrostrukturell aufgebaut und weiterentwickelt wurden. Um das entsprechende elastische Verhalten zu erreichen, sind somit hohe Lastraten nötig. In Abbildung 32 sind alle Messungen des Bauxitmaterials mit den ansteigenden Lastraten dargestellt. Es ist zu beachten, dass ein Y-Offset zu Beginn der Messungen in dieser Darstellung bereits berücksichtigt ist. Die generelle Trendlinie ist klar ersichtlich. Dennoch gibt es zwischen 0,7 MPa und 1 MPa resp. 1 MPa und 1,3 MPa kleine Abweichungen. In Abbildung 33 sind die für die Ermittlung des statischen E-Moduls des Bauxitsteins notwendigen elastischen Geraden für verschiedene Temperaturen dargestellt. Es sind deutlich höhere und auch realistischere E-Modul-Bestimmungen nun zu verzeichnen als vor dem Y-Offset. Wendepunkte wie in den Bestimmungen vorher sind in diesen Messungen nur bei 1200°C erkennbar. Die ermittelten Werte vor und nach der Y-Korrektur sind in Tabelle 4 aufgelistet. Bezüglich der statischen E-Modulwerte zeigt der Wert für 600°C die höchsten Abweichungen auf.

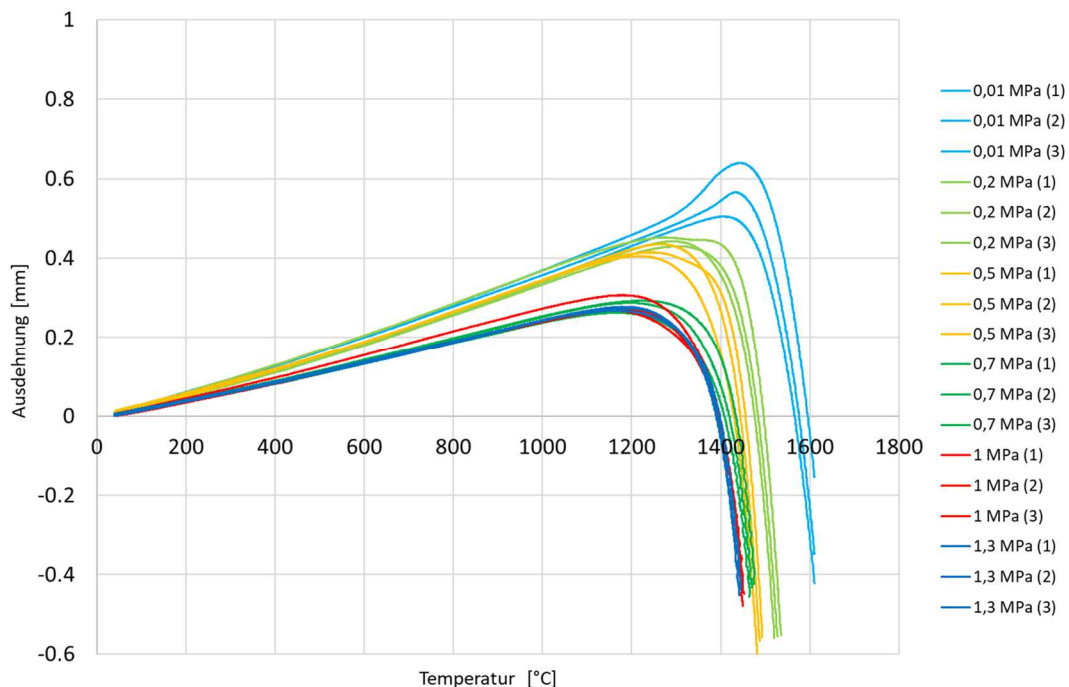


Abbildung 32: Temperatur-Dehnungsmessungen aus RUL-Tests unter verschiedenen Belastungen für Bauxitsteine (Mehrfachmessungen)

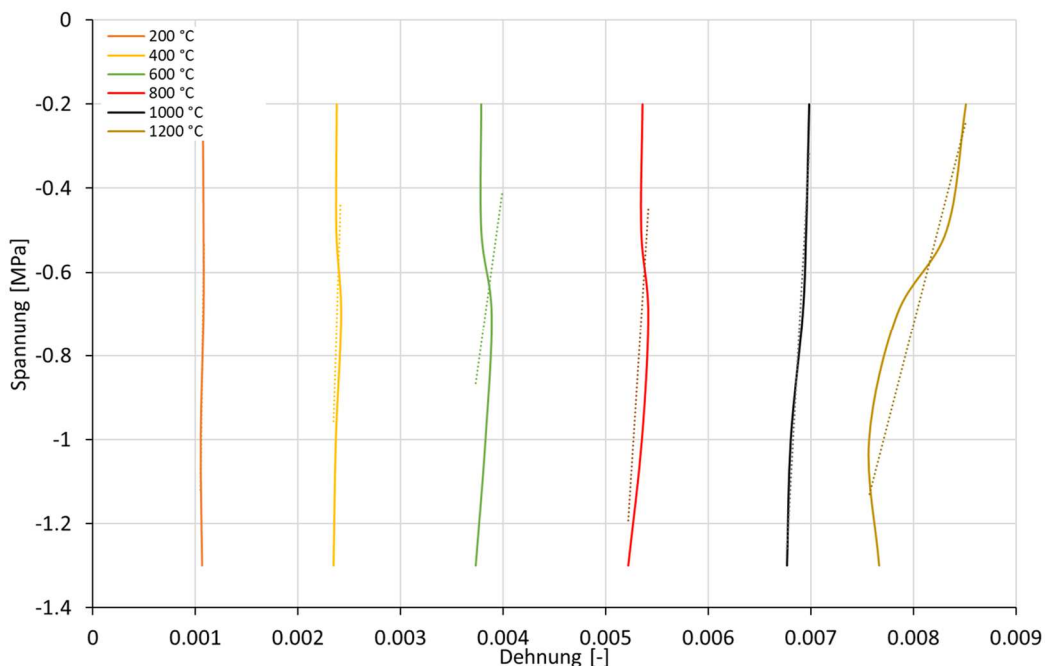


Abbildung 33: Aus Druckerweichungsversuchen des Bauxitmaterials (aus Abb. 30) erstellte elastische Geraden für verschiedene Temperaturen

Tabelle 4: E-Modul Bestimmungen aus den für verschiedene Temperaturen konstruierten Geraden aus Abb. 31 (RUL), Erstmessung sowie Korrektur nach Y-Offset-Abgleich

Temperatur [°C]	E-Modul RUL [GPa]	E-Modul RUL korrigiert [GPa]
200	4,0	20,1
400	3,5	7,6
600	2,7	1,8
800	2,6	3,8
1000	2,3	4,4
1200	0,8	0,9

Die zuvor ermittelten Messergebnisse für Wärmedehnung der Bauxitsteinproben (0,01 MPa) und die Messergebnisse für höhere Lasten bis 1,3 MPa zeigten zwar geringfügige Unterschiede untereinander auf, die Tendenz wurde jedoch eingehalten. Die Messreihen bei 0,01 MPa weisen die größte relative Längenänderung auf und die Reihe bis 1,3 MPa die geringste. Im Gegensatz zu früheren Messungen lassen sich nun aus den vorliegenden Messergebnissen Geraden zur Ermittlung des E-Moduls konstruieren. Die Materialgruppe der Feuerleichtsteine sowie die Bauxitsteine zeigen, wie oben beschrieben, dass das Messprinzip zur Ermittlung des E-Moduls geeignet ist. Die Vermutung, dass hierzu höhere Auflasten benötigt werden wurde somit auch unabhängig von zuvor durchgeführten Stauchversuchen bestätigt.

Zusammenfassend lässt sich für dieses Arbeitspaket festhalten, dass die ausgewählten Methoden für die Bestimmung von thermischer Dehnung und E-Modul die Bereitstellung der Daten für die FE-Methode ermöglichen. Die Methoden zur Bestimmung des benötigten statischen

E-Moduls wurden grundlegend verfeinert. Das neuartig angewendete DIC Verfahren zeigt prinzipielle Anwendbarkeit bis 600°C. Hierbei wurden die Methode der Biegelinie und korrigierte Wegdatenaufnahme bei Raumtemperatur realisiert und bis 600°C die Möglichkeiten und Abweichungen untersucht. Die Methode zur Erzeugung von Spannungs-Dehnungs-Beziehungen bei hohen Temperaturen durch den RUL-Test wurde sehr eingehend untersucht und verwendet. Für zwei feuerfeste Materialien konnten die Kennlinien bei unterschiedlichen Spannungen bis zu 1,3 MPa ermittelt werden. Dies Verfahren kann nun als gesicherte Methode verwendet und für andere feuerfeste Werkstoffe angewendet werden. Die ermittelten unterschiedlichen Werte für statischen und dynamischen E-Modul bei erhöhten Temperaturen sind erklärbar. Die durch den RUL-Test ermittelten Kennwerte des statischen Zustands sind nun gut für die Modellierungen evaluiert.

1.1.2. Validierung der Materialdaten anhand von Abgleichen zwischen FE-Simulation und Experiment (IBF)

Durchgeführte Arbeiten: Anhand der vom GHI bereitgestellten Messdaten konnten die Wärmeausdehnungskoeffizienten sowie E-Moduln für die einzelnen Versuche bzw. Materialien berechnet bzw. validiert werden. Für die Validierung wurden die verwendeten Materialdaten in entsprechenden FE-Modellen des 3-Punkt-Biegens und des Druckerweichens hinterlegt und die vom Solver berechnete Durchbiegung bzw. Längenänderung mit den experimentellen Messdaten verglichen. Da im Rahmen des Projekts lediglich die Wärmedehnung und das elastische Materialverhalten für homogene Temperaturverteilungen betrachtet wird, ist es nicht notwendig die jeweilige thermische Leitfähigkeit, die Dichte und die Wärmekapazität der betrachteten Materialien zu berücksichtigen, sodass diese jeweils mit einem Wert von eins angegeben wurden. Für das erstellte Modell wurden zunächst unterschiedliche Sensitivitätsanalysen durchgeführt: Konvergenzanalyse, 2D-Modellreduktion, Temperaturabhängigkeit des Wärmeausdehnungskoeffizienten. Anschließend wurde das Modell anhand der experimentellen Daten validiert.

Erzielte Ergebnisse: Das 3D-Modell des Druckerweichens rechnet mit einer Rechenzeit von ca. 2 Minuten auf einem handelsüblichen Computer bereits relativ schnell. Durch Umstellung auf ein rotationssymmetrisches 2D-Modell lässt sich die Rechenzeit jedoch noch mit ca. 10 Sekunden noch weiter reduzieren. Beide Modelle sind in Abbildung 34 dargestellt.

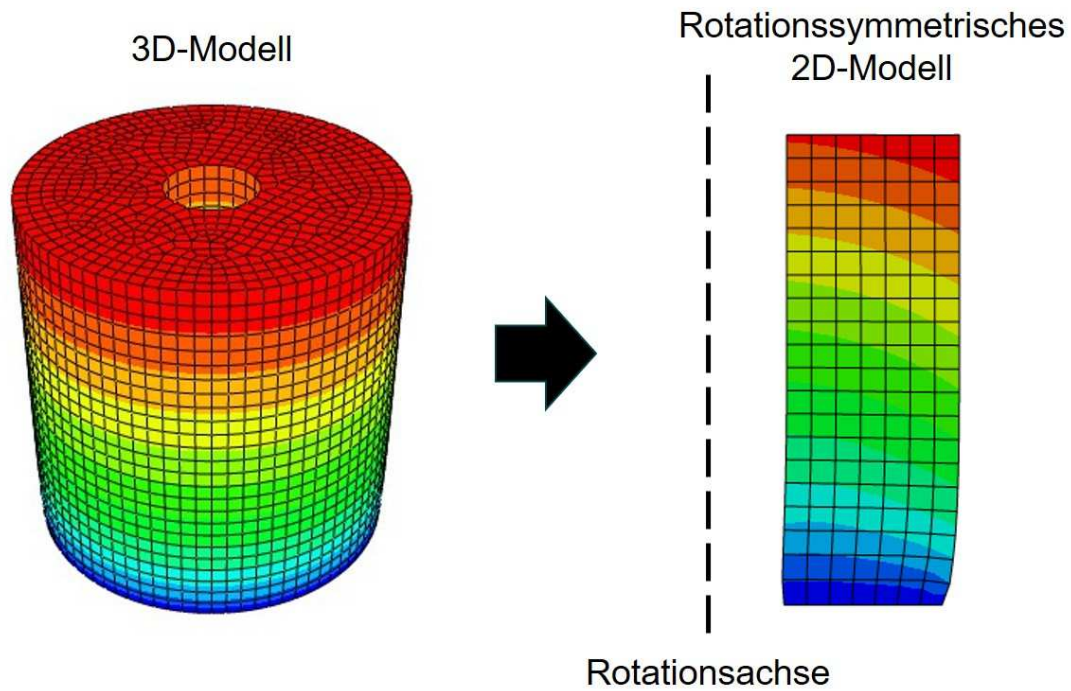


Abbildung 34: Modellreduktion des 3D-Modells zu einem rotationssymmetrischen 2D-Modell

Der in Abbildung 35 gezeigte Vergleich der von den Modellen errechneten Wärmedehnung bei einer am Modell angelegten Last von 0,01 MPa zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen beiden Modellen, sodass für alle weiteren Untersuchungen mit dem 2D-Modell weitergerechnet werden kann.

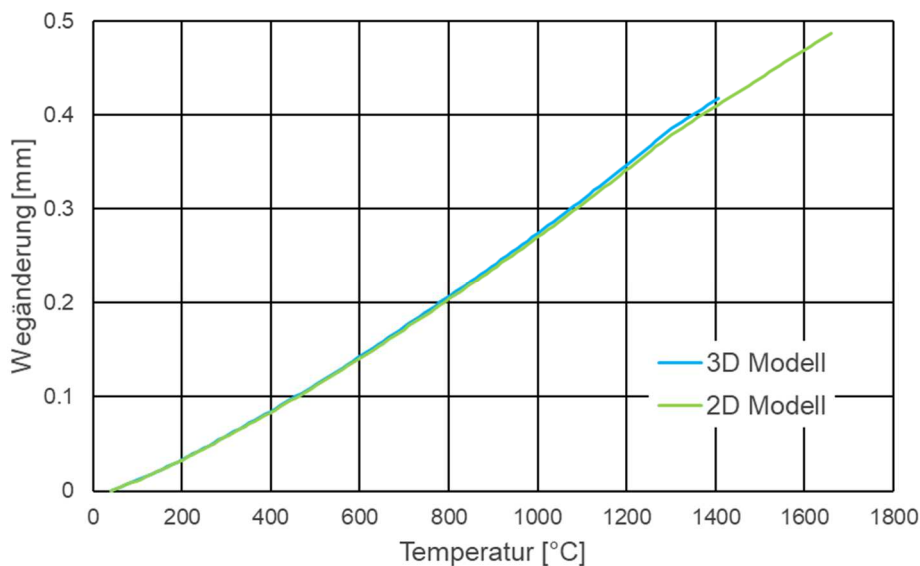


Abbildung 35: Vergleich der vom FE-Modell berechneten Wärmedehnung für ein 3D-Modell und ein rotationssymmetrisches 2D-Modell

Bezüglich des hinterlegten Wärmeausdehnungskoeffizienten wurde zunächst untersucht ob eine Temperaturabhängigkeit berücksichtigt werden muss oder nicht, hierzu wurde am Beispiel eines

Wärmedehnungs-Versuchs eines Bauxit-Steins der Wärmeausdehnungskoeffizient (WAK) für den gesamten elastischen Bereich (20 - 1600°C) und anschließend in 100 bzw. 200°C-Schritten bestimmt. Hierbei zeigte sich ein deutlicher Unterschied hinsichtlich der Ergebnissen für einen temperaturabhängigen WAK im Vergleich zu einem temperaturunabhängigen, eine Abbildung in 100°C-Schritten zeigte jedoch keine Steigerung der Genauigkeit der Simulationsergebnisse im Vergleich zur Abbildung in 200°C-Schritten, sodass letztere für alle weiteren Simulationen verwendet wird. Hinterlegt man die aus den experimentellen Daten ermittelten Wärmeausdehnungskoeffizienten im Modell und vergleicht anschließend die vom Modell berechnete Wärmeausdehnung mit der experimentell gemessenen Wärmeausdehnung, so zeigt sich für alle untersuchten Materialien eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment bis zum Druckerweichungspunkt, wie an einigen Beispielen in Abbildung 36 gezeigt. Das Modell konnte also hinsichtlich der Abbildung der Wärmedehnung validiert werden um nun mit gesicherter Vorgehensweise im nächsten Schritt das elastische Verhalten unter Last abzubilden.

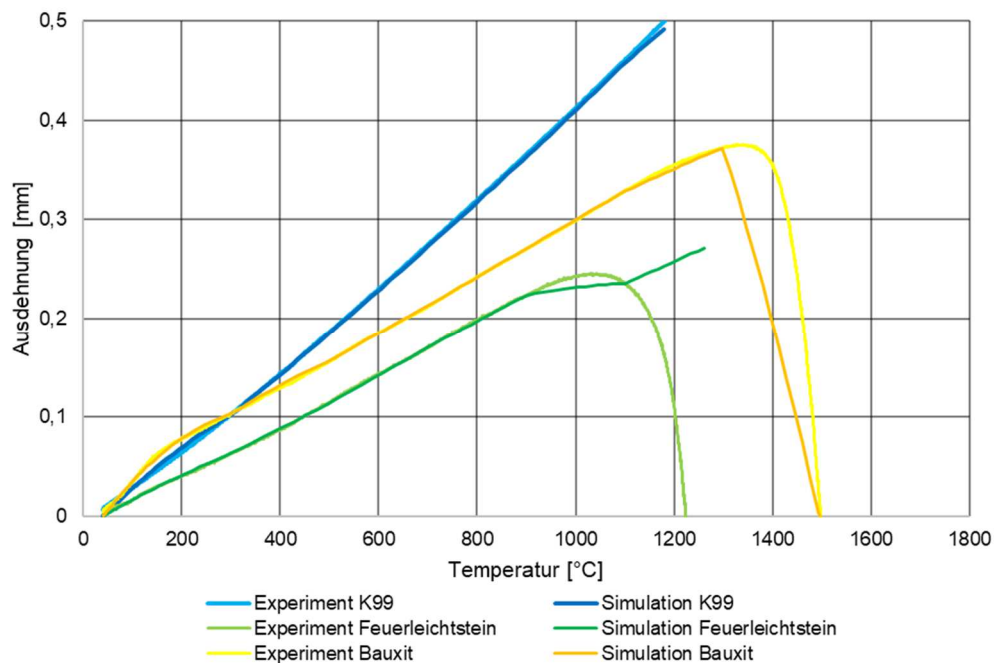


Abbildung 36: Vergleich der vom FE-Modell berechneten Wärmedehnung mit experimentellen Messergebnissen für verschiedene Materialien

Zur Validierung des ermittelten temperaturabhängigen E-Moduls wurden die entsprechenden E-Modul-Daten aus den Druckerweichungsversuchen und den RFDA-Messungen jeweils in einem Modell des Druckerweichens (1,3 MPa Last) hinterlegt. Der Abgleich der Temperatur-Längenänderungs-Daten von Simulation und Experiment, wie am Beispiel des Feuerleichtsteins der ASTM Gruppe 34 in Abbildung 37 gezeigt, zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment für die mittels Druckerweichens ermittelten E-Modul-Daten. Die Simulation mit den E-Modul-Daten aus der RFDA-Messung hingegen überschätzt die auftretenden Dehnungen deutlich, sodass die Ergebnisse der Simulation näher an experimentellen Daten eines DE-Versuchs mit 0,01 MPa liegen als an den eigentlich simulierten 1,3 MPa. Diese Ergebnisse legen nahe, dass der mittels DE ermittelte statische E-Modul den im

Druckerweichen auftretenden statischen Lastfall deutlich besser abbildet, als der dynamische E-Modul der RFDA-Messungen.

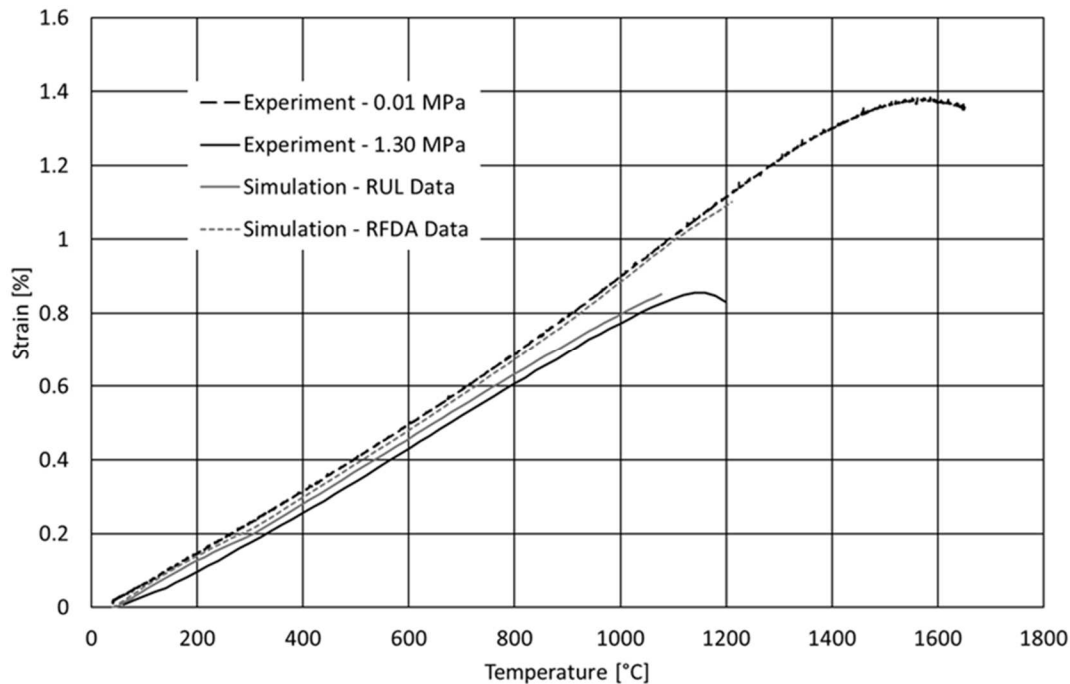


Abbildung 37: Validierung der ermittelten E-Modul-Daten mittels FE-Modell des Druckerweichens am Beispiel Feuerleichtstein ASTM Gruppe 34

Das FE-Modell des 3-Punkt-Biegeversuchs wurde als 2D-Modell aufgebaut. Um die Maschinensteifigkeit der Anlage abzubilden, wurden zusätzlich Federn an den unteren beiden Auflagern modelliert. Mit den zuvor mittels verschiedener Auswerteverfahren im 3-Punkt-Biegeversuch ermittelten E-Modul-Werten wurden jeweils Simulationen durchgeführt und anschließend wurde der Kraft-Weg-Schrieb der Anlage mit den Simulationsergebnissen verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Auswertung mittels Biegelinientheorie die beste Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment lieferte.

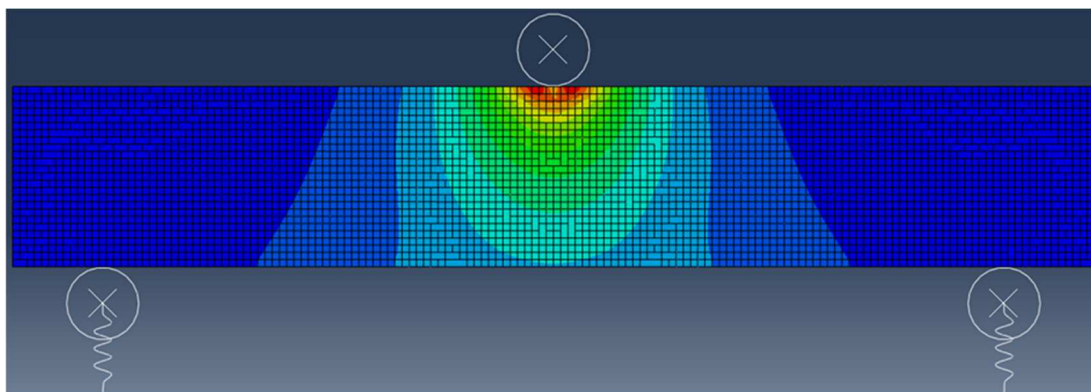


Abbildung 38: FE-Modell des 3-Punkt-Biegeversuchs

Ein anhand des Kraft-Weg-Schriebs invers ermittelter E-Modul weicht dabei nur geringfügig vom E-Modul der Biegelinientheorie ab, wie in Abbildung 39 zu sehen ist.

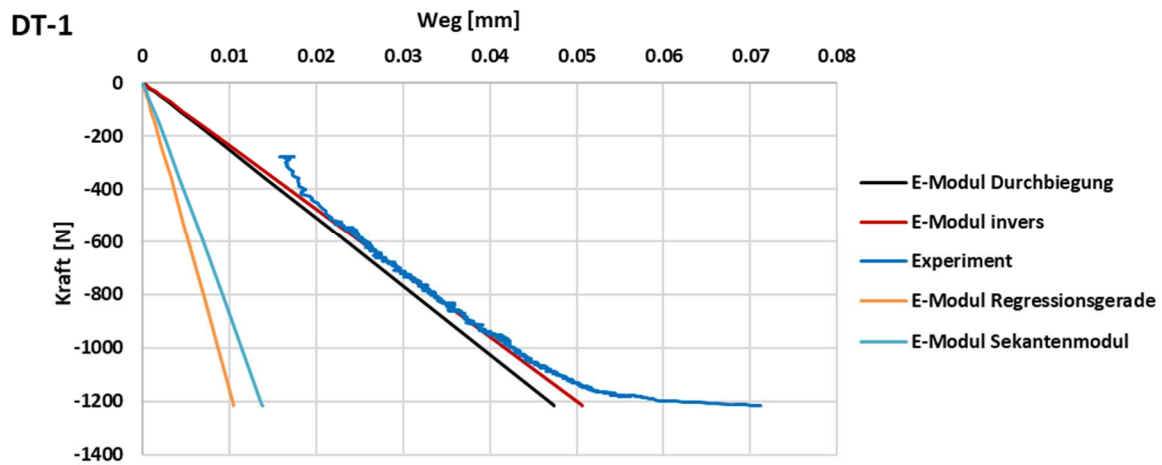


Abbildung 39: Vergleich der vom 3-Punkt-Biegemodell berechneten Kraft-Weg-Verläufe mit experimentellen Messergebnissen für verschiedene E-Modul-Werte

Zusammenfassend konnten anhand von FE-Simulationen des Druckerweichens und des Dreipunktbiegens die experimentell ermittelten Materialdaten (Wärmeausdehnungskoeffizient und E-Modul) der Feuerfest-Materialien erfolgreich validiert werden. Die Ergebnisse legen nahe, dass der Unterschied von dynamischen zu statischen E-Modul-Messverfahren durchaus signifikant ist. Für eine möglichst genaue numerische Vorhersage statischer Lastfälle sollten entsprechend statisch ermittelte Materialdaten verwendet werden.

1.2. Charakterisierung des Verbundes Feuerfest-Fuge (AP2, GHI)

Ziel: Experimentelle Abbildung und Charakterisierung des Einflusses von unterschiedlichem Fugenmaterial zwischen Feuerfest-Material mittels zwei- bzw. mehrteiliger Proben

Durchgeführte Arbeiten: Die aufgrund der Corona-Pandemie und des Umzugs der Forschungsstelle 1 zeitlich verschobenen Bestimmungen an gemörtelten Proben wurden in diesem Arbeitspaket bearbeitet. Die hierzu notwendigen Probekörper mit Fuge wurden bereits vorher vorbereitet. In Abbildung 40 ist ein Beispiel einer zweiteiligen Bauxitsteinprobe mit einer Mörtelfuge zu sehen.



Abbildung 40: Zweiteilige Bauxitsteinprobe mit einer Mörtelfuge für DE-Prüfung

Erzielte Ergebnisse: Messergebnisse der RUL-Bestimmungen für mehrteilige Bauxitstein-Proben mit Mörtelfuge sind in Abbildung 41 dargestellt. Die Belastung wurde hier zunächst von 0,01 MPa bis auf 0,5 MPa gesteigert. Eine Bestimmung des statischen E-Moduls durch die Isotherme ist aus diesen Messungen jedoch nicht bestimmbar, da die Schichtdicke der applizierten Mörtelschicht zu unterschiedlich war.

Als Lösungsansatz hierfür wurde dann die inverse Modellierung der einzelnen Messungen erkannt, da der E-Modul des feuerfesten Bauxitmaterials durch die vorhergehenden Messungen bekannt ist. Es erfolgte eine Variation der E-Modulwerte des Mörtels bis die angewandte Simulation und das angewandte Experiment gut übereinstimmten. Dies erfolgte durch drei Versuche pro Material, um die Reproduzierbarkeit der Methode zu überprüfen.

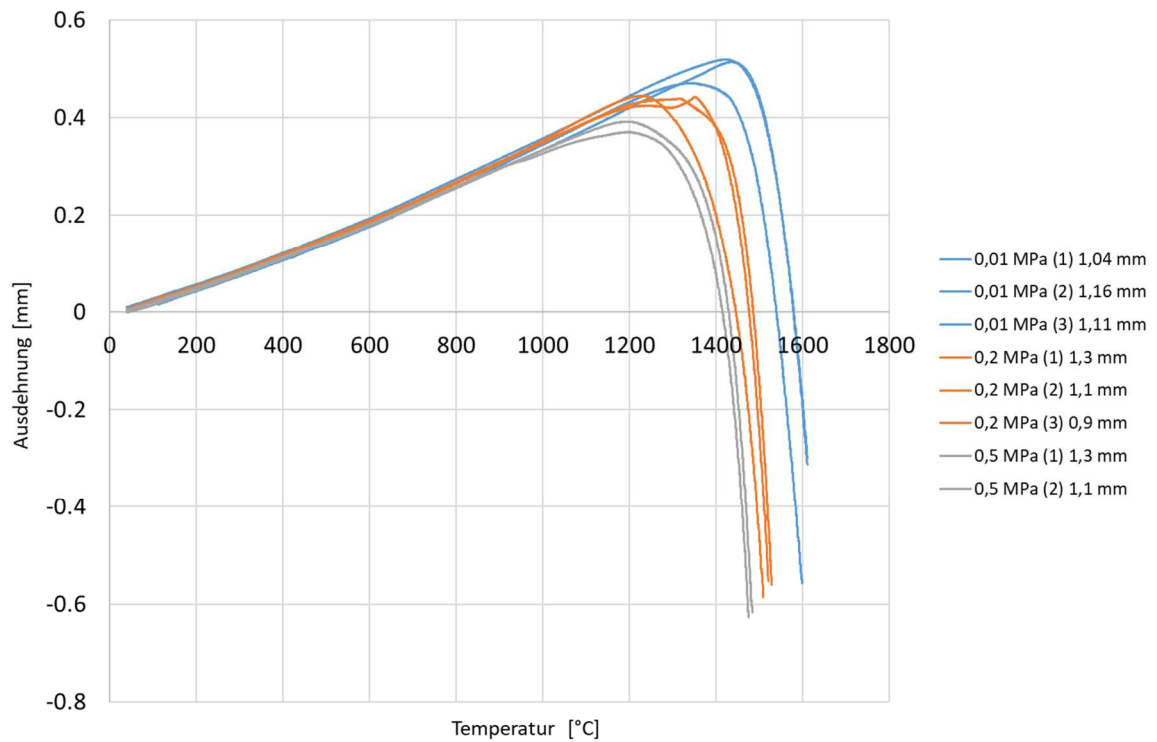


Abbildung 41: Temperatur-Dehnungsmessungen aus RUL-Tests unter verschiedenen Belastungen für mehrteilige Bauxitsteine (Mehrfachmessungen)

In diesem Arbeitspaket hat sich zum einen die RUL-Methode bestätigt. Die Erfassung der Daten bei höheren Drücken ist möglich. Stark einschränkend wirkt sich dabei jedoch die unterschiedliche Dicke der Mörtelschicht aus. Da dies jedoch eine anwendungsbezogene Einschränkung darstellt, wurde auf die Methode der inversen Modellierung für die Bestimmung der Hochtemperatur-Eigenschaften des Verbundes zurückgegriffen (vgl. Kapitel 1.3).

1.3. Numerische Homogenisierung des Materialverbunds und Validierung (AP3, IBF)

Ziel: Numerische Homogenisierung des Verbundes Feuerfest-Fugenmaterial und Validierung der ermittelten Materialdaten

Durchgeführte Arbeiten: Zunächst wurden die rechnerisch aus den Experimenten ermittelten Materialdaten in das FE-Modell des Druckerweichens hinterlegt, um die Ergebnisse mit den Messdaten abzugleichen. Darüber hinaus wurde mittels inverser Modellierung des Druckerweichens sowohl das Verhalten des Fugenmaterials ermittelt als auch das Gesamtverhalten der Materialkombination Feuerfest-Fugenmaterial (numerische Homogenisierung). Wie zuvor für die Vollkörper-Proben, wurden auch hier zunächst die Versuchsdaten bei 0,01 MPa verwendet um den Wärmeausdehnungskoeffizienten des Fugenmaterials bzw. des Materialverbundes zu bestimmen. Anschließend wurde anhand von Messdaten bei höheren Spannungen bis 0,5 MPa das elastische Verhalten des Fugenmaterials bzw. des Materialverbundes ermittelt.

Erzielte Ergebnisse: Zunächst wurde der Wärmeausdehnungskoeffizient für das Fugenmaterial ermittelt. Aufgrund der schwankenden Fugendicke bei den geprüften Proben konnte keine Mittelung der Messdaten vorgenommen werden, da sich aufgrund unterschiedlicher Anteile von Fugenmaterial zu Feuerfest-Material entsprechend abweichende Messergebnisse für die resultierende Wärmedehnung ergeben. Für die Ermittlung der Wärmedehnung wurden wie bei den Vollkörper-Proben die Versuche bei einer Spannung von 0,01 MPa herangezogen. Mit den zuvor ermittelten Werten für die Wärmedehnung des Bauxits konnte anteilig aus der gemessenen Gesamtdehnung zunächst der Anteil der Wärmedehnung des Bauxits errechnet werden.

Tabelle 5: Aus den Vollkörper-Versuchen errechneter Wärmeausdehnungskoeffizient (Referenztemperatur 40°C) für das feuerfeste Bauxit-Steinmaterial

Temperatur [°C]	200	400	600	800	1000	1200
WAK α [1/K]	7,27 E-06	6,87 E-06	7,01 E-06	7,25 E-06	7,45 E-06	7,66E -06

In Abbildung 42 sind exemplarisch die einzelnen Dehnungsanteile eines Versuchs abgebildet. Hier ist deutlich erkennbar, dass Aufgrund der geringen Fugendicke im Vergleich zum Anteil des Bauxits, die Dehnung der Mörtelfuge nur einen geringen Anteil an der Gesamtdehnung hat.

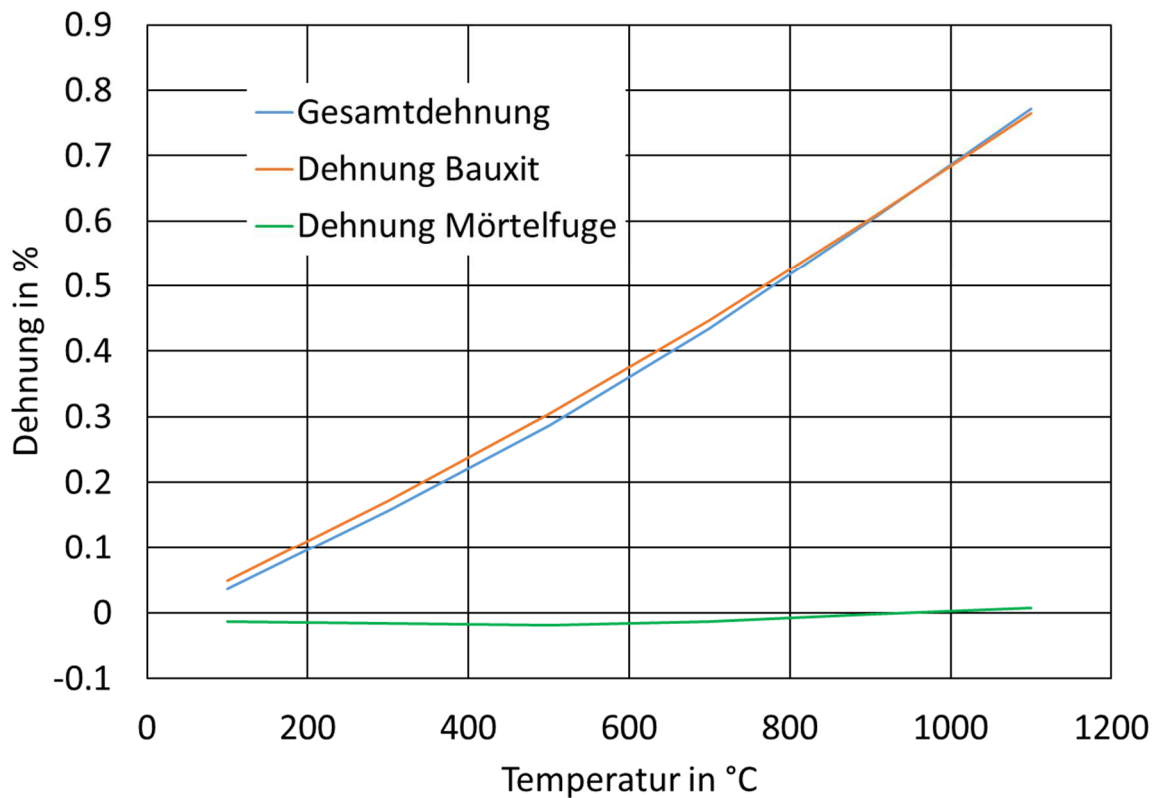


Abbildung 42: Gesamtdehnung sowie anteilige Dehnung von Bauxit und Mörtelfuge eines DE-Versuchs bei 0,01 MPa (Fugendicke 1,11 mm, Gesamtprobenhöhe 50,09 mm)

Die aus der Dehnung der Mörtelfuge errechneten temperaturabhängigen Wärmeausdehnungskoeffizienten sind für alle drei Versuchswiederholungen in Abbildung 43 zu finden. Hier ist deutlich erkennbar, dass die Wärmeausdehnungskoeffizienten einen ähnlichen Verlauf mit steigender Temperatur haben, die Absolutwerte aber trotz Berücksichtigung der Fugendicke durchaus schwankungsbehaftet sind. Das ist wahrscheinlich auf die Materialschwankungen von Mörtel und Feuerfest zurückzuführen, da die Berechnung des WAK für das Fugenmaterial auf WAK-Daten des Bauxits aus einem Versuch mit Vollkörper-Probe beruht. Grundsätzlich erscheint es unrealistisch, dass das Material einen negativen WAK besitzt. Mögliche Erklärungen wären ein weiterer Sintereffekt des Mörtels während der Erwärmung oder die Material- und Messschwankungen sind zu groß um die anteilige Wärmedehnung des Mörtels hinreichend genau zu erfassen.

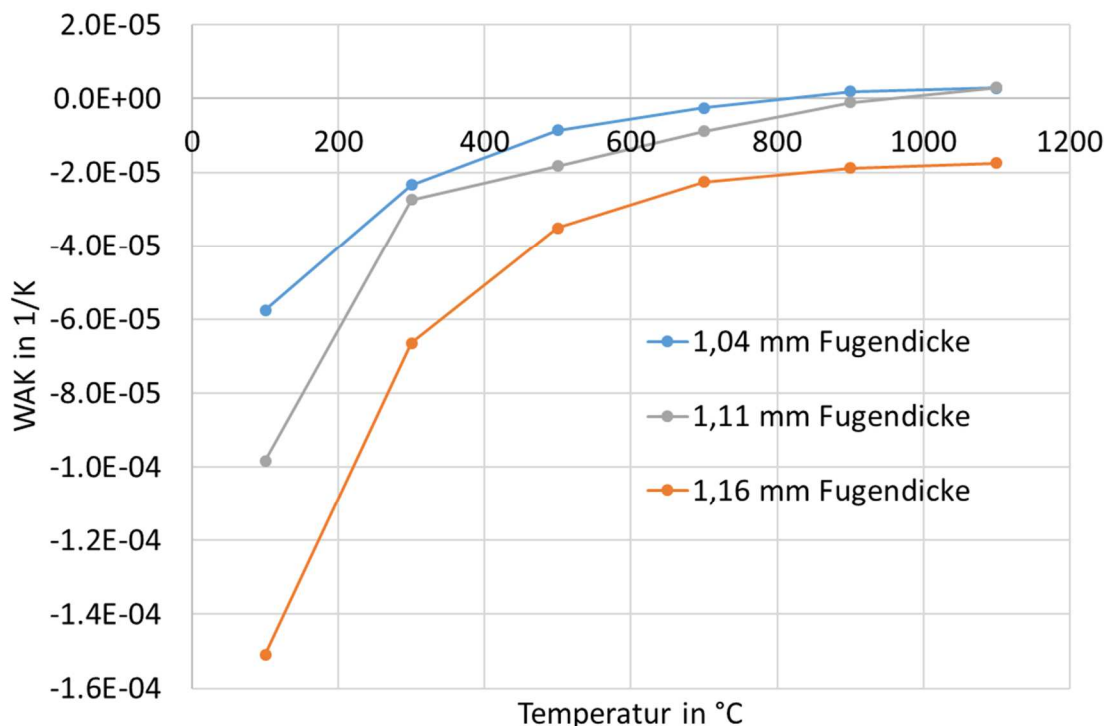


Abbildung 43: Aus den experimentellen Daten für das Fugenmaterial berechneter Wärmeausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit der Temperatur

Da der WAK für das Fugenmaterial lediglich aus Verbund-Versuchen (Feuerfest – Fugenmaterial) ermittelt werden konnte, wurde auf die Abbildung eines Referenz-Volumen-Elements (RVE) zur numerischen Homogenisierung des Materialverbundes verzichtet. Hierbei würde letztlich lediglich der zuvor beschriebenen experimentellen Messunsicherheit des Verbund-Versuches mit abgebildet. Stattdessen erscheint eine Anpassung der experimentell ermittelten WAKs mittels inverser Modellierung zielführender. Dazu wurde zunächst ein WAK, welcher das Gesamtverhalten der Verbund-Proben abbildet, aus den experimentellen Messdaten errechnet. Die ermittelten WAKs des Materialverbundes sind in Tabelle 6 für die drei Versuchswiederholungen bei 0,01 MPa angegeben. Aufgrund der unterschiedlichen Schichtdicke der Mörtelfuge ist die Bildung von Mittelwerten nicht sinnvoll.

Tabelle 6: Aus den Verbund-Versuchen ermittelte Wärmeausdehnungskoeffizienten (Referenztemperatur 40°C) für das Verbundmaterial (Bauxit-Mörtel)

Temperatur [°C]	Probenhöhe 49,9 mm Fugendicke 1,04 mm	Probenhöhe 50,5 mm Fugendicke 1,16 mm	Probenhöhe 51,2 mm Fugendicke 1,11 mm
	WAK α [1/K]	WAK α [1/K]	WAK α [1/K]
200	6,43E-06	4,61 E-06	5,98 E-06
400	6,45 E-06	5,61 E-06	6,10 E-06
600	6,72 E-06	6,12 E-06	6,37 E-06
800	7,09 E-06	6,55 E-06	6,80 E-06
1000	7,35 E-06	6,76 E-06	7,14 E-06
1200	7,58 E-06	7,07 E-06	7,38 E-06

Ein Abgleich der FE-Simulation mit dem ermittelten Verbund-WAK ist in Abbildung 44 gezeigt. Für die Simulation mit den Verbund-WAK-Daten welche direkt aus den experimentellen Messdaten ermittelt wurden zeigt sich bereits eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment. Lediglich im Bereich bis 400 °C sind noch geringe Abweichungen zwischen Simulation und Experiment erkennbar. Die inverse Modellierung der WAK-Daten, also eine Anpassung der Daten bis die Abweichung zwischen Simulation und Experiment minimiert ist, liefert eine nochmalige Verbesserung, sodass auch der Bereich bis 400 °C eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment aufweist für die invers ermittelten WAK-Daten.

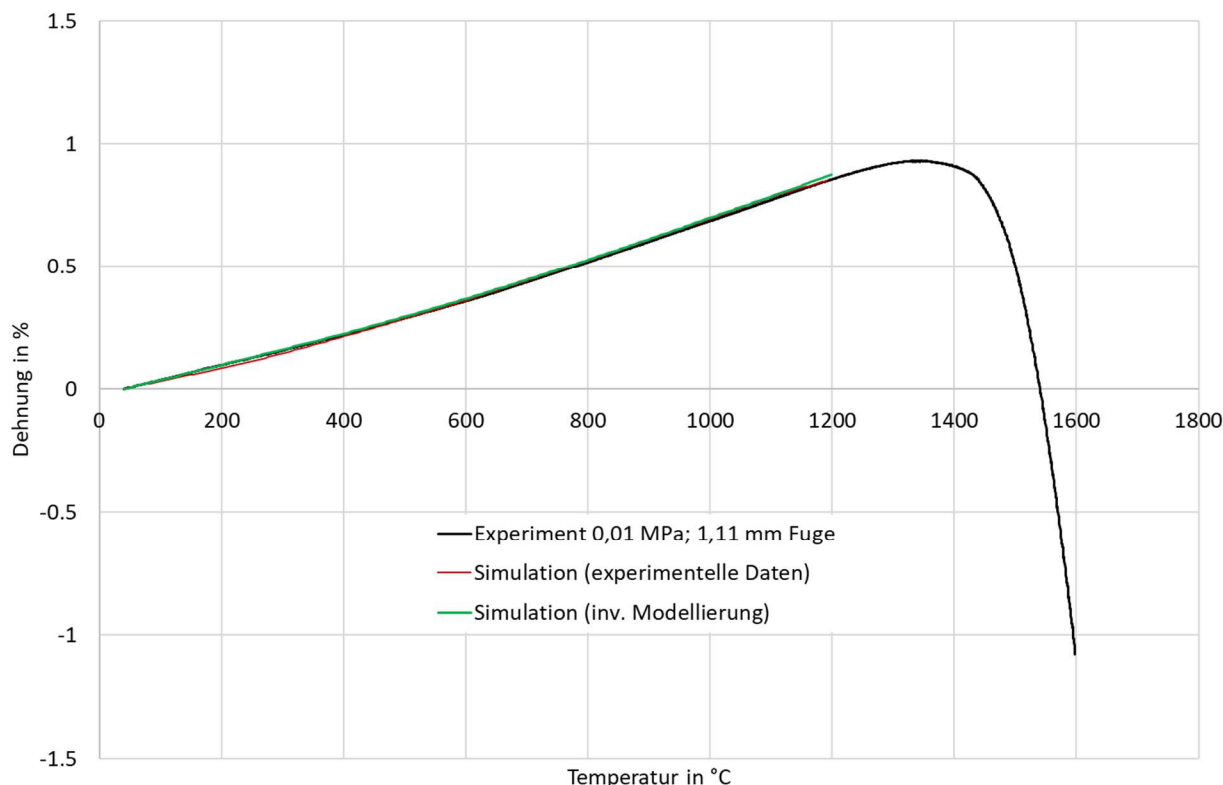


Abbildung 44: Vergleich von Simulationsergebnissen mit verschiedenen WAK-Daten mit zugehörigem DE-Versuch bei 0,01 MPa Spannung (Bauxit-Mörtel)

Tabelle 7: Gegenüberstellung der für den Material-Verbund invers ermittelten WAK-Daten mit den experimentell ermittelten Daten (Bauxit-Mörtel)

Temperatur [°C]	Ergebnis inverse Modellierung	Probenhöhe 51,2 mm Fugendicke 1,11 mm
	WAK α [1/K]	WAK α [1/K]
200	6,09 E-06	5,98 E-06
400	6,22 E-06	6,10 E-06
600	6,54 E-06	6,37 E-06
800	6,94 E-06	6,80 E-06
1000	7,28 E-06	7,14 E-06
1200	7,55 E-06	7,38 E-06

Aufgrund der schwankenden Schichtdicken der Verbundproben lassen sich die ermittelten WAK-Daten nicht ohne weiteres für die E-Modul-Ermittlung auf alle Versuche mit höheren Spannungen übertragen. Für Versuche mit einem anderen Bauxit-Mörtel-Verhältnis würde das Wärmedehnungs-Verhalten nicht korrekt durch die ermittelten Daten abgebildet werden. Eine gute Übereinstimmung hinsichtlich des Bauxit-Mörtel-Verhältnisses gab es für den Versuch bei 0,01 MPa mit einer Fugendicke von 1,16 mm für einen Versuch bei 0,5 MPa mit einer Fugendicke von 1,20 mm und einer Gesamt-Probenhöhe von 50,4 mm. Anhand dieser Versuchskombination konnte entsprechend sowohl eine Bestimmung des E-Moduls anhand der experimentellen Daten durchgeführt werden sowie eine inverse Modellierung des E-Moduls. Für die Ermittlung des E-Moduls aus den experimentellen Daten wurden die zuvor ermittelten WAK-Werte genutzt um die Anteile der Wärmedehnung des Experiments bei 0,5 MPa zu berechnen um diese von der gemessenen Dehnung zu subtrahieren. Somit bildet die verbleibende Dehnung das elastische Verhalten der Probe ab, anhand dessen der temperaturabhängige E-Modul berechnet werden kann, die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 8 zu finden.

Tabelle 8: Aus den Verbund-Versuchen errechneter E-Modul für den Material-Verbund (Bauxit-Mörtel)

Temperatur [°C]	200	400	600	800	1000	1200
E-Modul [MPa]	583,56	223,22	136,16	95,58	74,17	70,25

Zur Validierung der so errechneten E-Modul-Daten wurden die Daten im Simulationsmodell des DE-Versuches hinterlegt und mit den experimentellen Messdaten verglichen, wie in Abbildung 45 gezeigt. Hier zeigen sich jedoch gravierende Abweichungen zwischen Simulation und Experiment. Dies kann mehrere Gründe haben. Einerseits stammen die verwendeten WAK-Daten für die Simulation aus dem Versuch bei 0,01 MPa, sodass sich grundsätzlich Materialschwankungen und Messunsicherheiten bemerkbar machen.

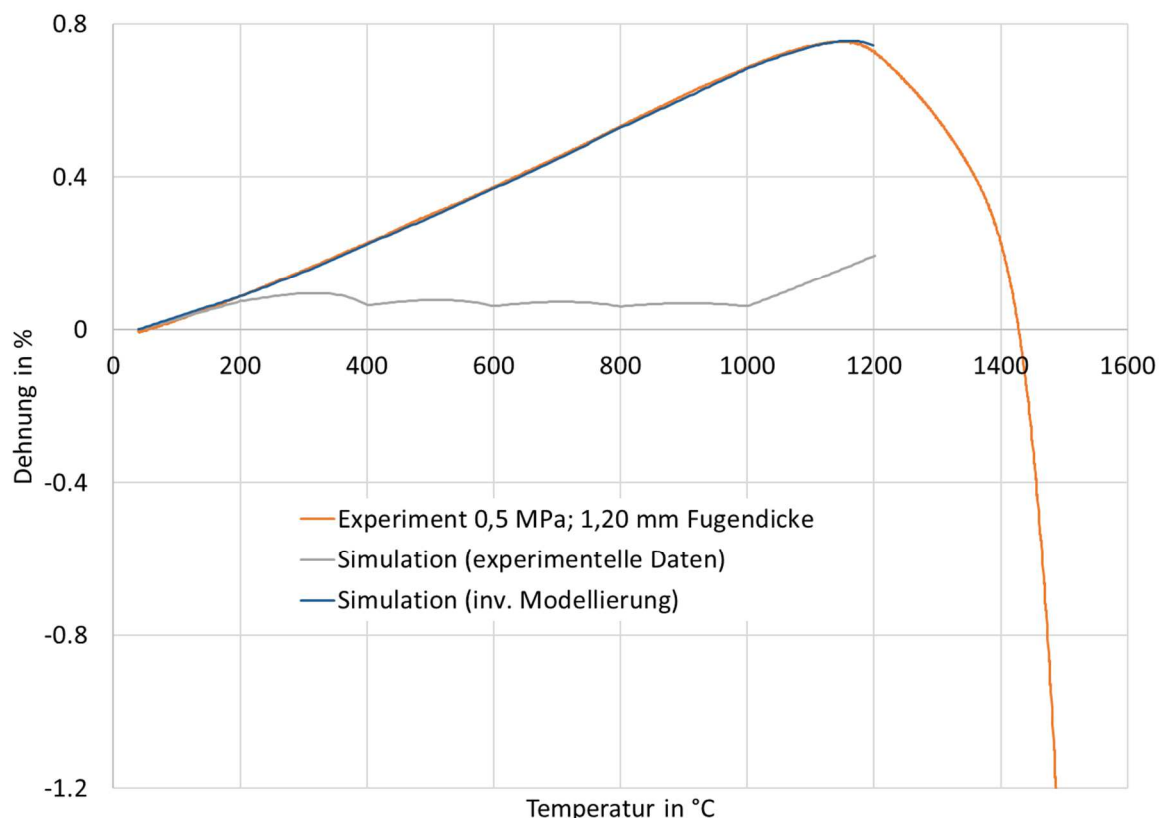


Abbildung 45: Vergleich von Simulationsergebnissen mit verschiedenen E-Modul-Daten mit zugehörigem DE-Versuch bei 0,5 MPa Spannung (Bauxit-Mörtel)

Andererseits sind die Spannungen mit 0,5 MPa verhältnismäßig gering, sodass die Wärmedehnung einen erheblichen Anteil der gemessenen Dehnung ausmacht. Mit zunehmender Spannung würde auch der Anteil der elastischen Dehnung der Probe zunehmen, sodass eine zuverlässigere experimentelle Abbildung des elastischen Verhaltens möglich sein sollte. Wie zuvor für die WAK-Daten wurde auch hier eine inverse Modellierung der E-Modul Daten durchgeführt um eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment zu erreichen. Die mittels inverser Modellierung ermittelten E-Modul-Daten sind in Tabelle 9 zu finden.

Tabelle 9: Gegenüberstellung der für den Material-Verbund invers ermittelten WAK-Daten mit den experimentell ermittelten Daten (Bauxit-Mörtel)

Temperatur [°C]	Ergebnis inverse Modellierung	Probenhöhe 50,4 mm Fugendicke 1,16 mm
	E-Modul [MPa]	E-Modul [MPa]
200	583,56	550
400	223,22	650
600	136,16	750
800	95,58	800
1000	74,17	850
1200	70,25	900

Die beste Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment ergibt sich für einen mit steigender Temperatur ansteigenden E-Modul. Typischerweise ist mit steigender Temperatur ein abfallender E-Modul zu erwarten. Die Ergebnisse legen daher ebenfalls nahe, dass die aufgebrachte Spannung nicht groß genug ist, um eine ausreichend große elastische Reaktion der Probe herbeizuführen. Ein ansteigender E-Modul lässt vermuten, dass die hinterlegten Verbund-Materialdaten die tatsächliche Wärmedehnung mit zunehmender Temperatur überschätzen. Dies würde bei der E-Modul-Ermittlung in einer Unterschätzung der elastischen Dehnungsanteile resultieren und folglich zur Berechnung von zu hohen bzw. ansteigenden E-Modul-Werten führen. Für zukünftige Untersuchungen scheint es daher empfehlenswert, größere Spannungen zu untersuchen.

Zusammenfassend konnten im Rahmen des APs die experimentell ermittelten WAK-Daten (experimentelle Homogenisierung) für den Materialverbund mittels FE-Simulationen validiert werden. Eine numerische Ermittlung der Materialdaten mittels inverser Modellierung lieferte vergleichbar gute Ergebnisse wie die experimentelle Homogenisierung und konnte stellenweise noch etwas bessere Ergebnisse erzielen. Die Validierung der experimentell ermittelten E-Modul-Daten legte nahe, dass aufgrund von Messunsicherheiten und Schwankungen in den Verbund-Schichtverhältnissen eine Ermittlung des E-Moduls für den Materialverbund aus den experimentellen Messdaten zu ungenau ist. Die Ergebnisse der inversen Modellierung des elastischen Verhaltens legen zudem nahe, dass sowohl für eine experimentelle als auch numerische Ermittlung des elastischen Verbund-Verhaltens höhere Prüflasten notwendig sind.

2. Verwendung der Zuwendung

2.1. Forschungsstelle 1 - Institut für Gesteinshüttenkunde

Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans):

Das Forschungsprojekt war im Zeitraum der Projektbearbeitung (01.06.2020 - 31.05.2023) durchgängig mit wissenschaftlich-technischem Personal besetzt. In Summe wurden 23,33 Personenmonate in der Forschungsstelle 1 eingesetzt.

Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans):

Es wurde ein System zur Messung von Verschiebungen, Deformation und Dehnungen mittels optischem Verfahren mit Mitteln in Höhe von € 41.590,50 im Februar 2021 angefordert und geliefert.

Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans): entfällt

2.2. Forschungsstelle 2 - Institut für Bildsame Formgebung

Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans):

Das Forschungsprojekt war im Zeitraum der Projektbearbeitung (01.06.2020 - 31.05.2023) nicht durchgängig mit wissenschaftlich-technischem Personal besetzt. In Summe wurden 12 Personenmonate in der Forschungsstelle 2 eingesetzt.

Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans): entfällt

Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans): entfällt

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Projekt gliedert sich in die drei Arbeitspakete "Ermittlung und Validierung von Materialdaten", "Charakterisierung des Verbundes Feuerfest-Fuge" und "Numerische Homogenisierung des Materialverbundes und Validierung". Die Bearbeitung begann im Juni 2020 im Rahmen der Bearbeitung des ersten Arbeitspaketes. Das Arbeitspaket "Ermittlung und Validierung von Materialdaten" beinhaltet die für das weitere Vorgehen unabdingbare Materialcharakterisierung der Vollkörper-Proben hinsichtlich der prinzipiellen Durchführbarkeit und Ermittlung von Wärmeausdehnungskoeffizienten und E-Modul im Druckerweichungsversuch. Der Druckerweichungsversuch ist aufgrund der geringen Aufheiz- und Abkühlraten durch lange Versuchslauf- und Vorbereitungszeiten geprägt. Hier hat sich eine technische Herausforderung ergeben, dass die industriell hergestellten feuerfesten Werkstoffe mit dem normgerecht erreichbaren Spannungsniveau im Sinne einer gut messbaren Verformung nicht ausreichend belastet werden konnten. Durch Umbau und Adaptierung von Anlagenparametern konnte dann jedoch bereits nach den ersten 6 Monaten Projektlaufzeit für ein breites Spektrum an Materialien

der Wärmeausdehnungskoeffizient ermittelt werden. Für die exemplarisch ausgewählten feuerfesten Baustoffe, ein Feuerleichtstein der ASTM Gruppe 34 und ein Bauxitstein (B85T), konnten die grundlegende Anwendbarkeit der erarbeiteten Methodik zur E-Modul-Ermittlung gezeigt und zunehmend Daten ermittelt werden. Parallel wurde für ein weiteres Arbeitspaket das Simulationsmodell erstellt, validiert und optimiert, welches nach kürzester Rechenzeit in der Lage ist die bisher erzielten experimentellen Messergebnisse (Wärmeausdehnung, E-Modul) sehr gut abzubilden. Zum Vergleich und zur weiteren Vertiefung des Verständnisses des Werkstoffverhaltens sind weitere Messverfahren zur statischen und dynamischen E-Modulbestimmung angewendet, Resultate verglichen und Abweichungen diskutiert worden.

In Ergänzung zur Antragsstellung sollte für die Bearbeitungsphase erwähnt werden, dass bei der Inbetriebnahme des Großgerätes zur Bestimmung der Deformation und Dehnung (GOM) ein zeitlicher Mehraufwand bei der Inbetriebnahme entstanden ist. Das Gerät wurde für die Projektdurchführung kalibriert und adaptiert, um die Verwendung für die im Vorhaben verwendeten Proben zu gewährleisten, was zeitaufwändiger als geplant war.

In der zweiten Hälfte des Jahres 2021 begann die aktive Phase des Umzuges der Forschungsstelle 1 in ein neues Gebäude. In dieser Periode bis 2022 gab es kaum und nur sehr eingeschränkt die Möglichkeit der Gerätenutzung der zentralen DE-Prüfeinrichtung. Die unerwartete Verlängerung dieser Umzugszeit von 3 Monaten muss zusätzlich berücksichtigt werden. Demzufolge wurde eine Laufzeitverlängerung bis 30.05.2023 begründet beantragt und vom BMWK bewilligt. Alle Änderungen des Zeitplans und des Versuchsplans wurden mit dem projektbegleitenden Ausschuss diskutiert und abgestimmt. In diesem Verlängerungszeitraum wurde das AP3 "Charakterisierung des Verbundes Feuerfest-Fuge" vervollständigt und mit der Validierung der inversen Modellierung abgeschlossen.

Die definierten Arbeitsschritte wurden daher von beiden Forschungsstellen angemessen bearbeitet.

Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Antragsgemäß war das übergeordnete Ziel des Vorhabens, die numerische Auslegung von FF-Anlagen durch die Entwicklung eines Verfahrens zur Materialdatenermittlung und Homogenisierung anhand genormter Versuche zu vereinfachen. Um das Verfahren der Homogenisierung für KMUs zugänglich zu machen, wurde im Rahmen des Projektes die Methodik entwickelt, welche es ermöglicht, die Homogenisierung bzw. die dafür notwendige Materialcharakterisierung mittels genormter Versuche durchzuführen.

Zur Umsetzung wurden zunächst verschiedene genormte Verfahren der Feuerfest-Materialprüfung verwendet, die sowohl bei Raumtemperatur als auch bei hohen Temperaturen bis 1200°C und unter Berücksichtigung unterschiedlicher mechanischer Modelle zum Einsatz kamen.

Bestimmung des statischen E-Moduls:

- Bestimmung des Druckerweichens nach DIN EN 993-8 unter Verwendung höherer Lasten bis 1,3 MPa (Ermittlung des statischen E-Moduls aus den ermittelten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen)
- E-Modulmessung mittels Digital Image Correlation (DIC) (Bestimmung des E-Moduls mittels Biegelinienanalyse)

Bestimmung des dynamischen E-Moduls:

- Bestimmung mittels Hochtemperatur-Resonanzfrequenz-Dämpfungsanalyse (HT-RFDA) nach ASTM C 1259-08

Bestimmung der thermischen Dehnung:

- Bestimmung der thermischen Dehnung nach DIN EN 993-19 (Verwendung des Prinzips des Druckerweichens nach DIN EN 993-8 ohne Last)
- Bestimmung der thermischen Dehnung mittels Dilatometrie

Die Eigenschaftsbestimmung wurde sowohl an den Feuerfest-Materialien als auch am Verbund Feuerfest-Fuge durchgeführt, was zur experimentellen Homogenisierung und Validierung anhand genormter Versuche führte. Im Verlauf des Projektes wurde deutlich, dass die Aufbringung erhöhter Lasten beim Druckerweichungsversuch zunehmend schwieriger wurden bei der Anwendung mechanisch hoch belastbarer Feuerfest-Werkstoffe. Somit wurde das AP 1 länger ausgeführt als im Antrag zunächst vorgesehen, was final auch zur Kosten neutralen Verlängerung des Projektes führte. Dennoch war diese zeitlich längere Ausführung technisch und für den Projektverlauf notwendig und angemessen. Parallel wurde eine Methode erforscht, die im Biegeversuch den Messverlauf digital korrigierte und somit eine weitere Methode mittels Biegelinientheorie zur Bestimmung des statischen E-Moduls liefert. Auch diese Methode wurde im Antrag ausgeschrieben und mit einer durch das Projekt finanzierten Anlage validiert. Im Hinblick auf die Erweiterung von Methoden und die Verfügbarkeit durch KMUs ist dieses Vorgehen ebenfalls antragsgemäß, nun technisch umgesetzt und anwendbar.

Durch die technische Herausforderung der Verwendung hoher Lasten beim Druckerweichungsversuch unter Verwendung industrienaher feuerfester Werkstoffe konnten nicht alle im Antrag vorgesehene Werkstoffe untersucht werden. Es wurde mit dem PA abgestimmt, zwei wichtige Modellwerkstoffe besonders intensiv zu untersuchen und eine detaillierte Verfahrensweise auszuarbeiten. Die Ermittlung der Kennlinien und Materialdaten erfolgt nun seitens der Industriepartner des PA und wird durch die Deutsche Gesellschaft für Feuerfest- und Schornsteinbau (DGFS) allen zur Verfügung gestellt. Somit sind die Veröffentlichung und die Verbreitung der Daten gewährleistet.

Im Arbeitspaket 2 ist die Charakterisierung des Verbunds Feuerfest-Fuge durchgeführt worden. Die Methodik der Verwendung des Druckerweichungsverfahrens wurde dabei für den Feuerfest-Fuge-Verbund bestätigt und validiert. Als wesentliches Ergebnis dieser Untersuchungen ist der Einfluss der Fugendicke herausgearbeitet worden. Somit wurde die in Arbeitspaket 3 durchgeführte numerische Homogenisierung des Materialverbunds hier besonders intensiv ausgearbeitet und parallel zu den experimentellen Datenerhebungen in Arbeitspaket 2 validiert. Dies führte zu einer sehr guten Methode der inversen Modellierung und zur Simulation der Daten

und v.a. deren Material- und Temperaturabhängigkeit. Es liegen nun Daten für die folgenden Eigenschaften vor:

- Wärmeausdehnungskoeffizienten für das feuerfeste Bauxit-Steinmaterial
- Gesamtdehnung sowie anteilige Dehnung von Bauxit und Mörtelfuge
- berechneter Wärmeausdehnungskoeffizient für das Fugenmaterial in Abhängigkeit der Temperatur
- Aus den Verbund-Versuchen ermittelte Wärmeausdehnungskoeffizienten (Referenztemperatur 40°C) für das Verbundmaterial (Bauxit-Mörtel)
- Gegenüberstellung der für den Material-Verbund invers ermittelten WAK-Daten mit den experimentell ermittelten Daten (Bauxit-Mörtel)
- Aus den Verbund-Versuchen errechneter E-Modul für den Material-Verbund (Bauxit-Mörtel)

Die Vorgehensweise der zeitlich parallel durchgeführten Arbeitspakete 2 und 3 hat sich vollständig bewährt. Methode und zeitliche Dauer waren zielführend und angemessen.

Insgesamt ist das übergeordnete Ziel des Vorhabens erreicht worden. Benötigter Zeitraum und die angewendeten Arbeitspakete waren hinsichtlich Notwendigkeit und geleisteter Arbeit angemessen. Die Verfügbarkeit der benötigten Werkstoff-Kenndaten für weitere Werkstoffe und Werkstoff-Fuge-Verbünde sind sichergestellt, da die Datenerfassung nun gesichert vielfach erfolgen kann.

4. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

4.1. Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum, Ort
Online-Veröffentlichung	Schnelle und umfassende Informationsverbreitung im Internet	Dgfs-Homepage, Information über Projektstart, GHI-Homepage, Information zum Projektstrat	02.06.2020, 16.06.2020
Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Fortlaufende Vorstellung und Diskussion des Forschungsprojektes	Kick-Off-Sitzung mit PA	30.06.2020, digital
Fachkonferenz	Wissenstransfer durch Vortrag	dgfs- Arbeitsgruppensitzung	26.10.2020, digital
Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Fortlaufende Vorstellung und Diskussion der Forschungsergebnisse	2. PA-Sitzung	25.11.2020, digital
Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Fachbeiträge in Fachzeitschriften	Beitrag zum Stand des Projekts dgfs Echo	Februar 2021
Fachkonferenz	Wissenstransfer durch Vortrag	dgfs-Jahrestagung	14.05.2021, digital
Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Fortlaufende Vorstellung und Diskussion der Forschungsergebnisse	PA-Sitzung	29.06.2021, digital
Fachkonferenz	Wissenstransfer durch Vortrag	dgfs-Mitgliederversammlung	08.10.2021, digital
Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Fachbeiträge in Fachzeitschriften	Beitrag zum Stand des Projekts dgfs Echo	Februar 2022
Fachkonferenz	Wissenstransfer durch Vortrag	UNITECR, Unified Technical Conference of Refractories	16.03.2022, Chicago, USA
Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Fortlaufende Vorstellung und Diskussion der Forschungsergebnisse	PA-Sitzung	11.08.2022, Aachen
Fachkonferenz	Wissenstransfer durch Vortrag	ICR, Internationales Feuerfest-Kolloquium	28.09.2022, Aachen
Fachkonferenz	Wissenstransfer durch Vortrag	dgfs-Mitgliederversammlung	21.10.2022, Heidelberg
Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Fortlaufende Vorstellung und Diskussion der Forschungsergebnisse	PA-Sitzung	12.01.2023, Aachen
Fachkonferenz	Wissenstransfer durch Vortrag	Jahrestagung Deutsche Keramische Gesellschaft (DKG)	29.03.2023, Jena
Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Fachbeiträge in Fachzeitschriften	Beitrag zum Stand des Projekts dgfs Echo	April 2023
Fachkonferenz	Wissenstransfer durch Vortrag	dgfs-Mitgliederversammlung	12.05.2023, Lübeck

4.2. Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen		Datum/ Zeitraum
Maßnahme A: Fachkonferenzen	Wissenstransfer durch Vorträge / Vorstellungen auf Fachkonferenzen und Tagungen	A1	Unified Technical Conference on Refractories (Frankfurt)	September 2023
		A2	International Conference on Refractories (ICR, Aachen)	September 2024
		A3	dgfs-Mitgliederversammlungen sowie div. Arbeitsgruppensitzungen und Fachtagungen	Ab 10/2023
		A4	Jahrestagung DKG (Höhr-Grenzhausen)	09/2024
Maßnahme B: Fachzeitschriften	Veröffentlichung der Ergebnisse durch Fachbeiträge in Fachzeitschriften	B1	dgfs Echo	04/2024
		B2	Refractory Worldforum RWF	01/2024
		B3	Journal Am. Ceramic Society (ACERS)	04/2024
Maßnahme C: Online- Veröffentlichung	Schnelle und umfassende Informationsverbreitung im Internet	C1 C2	Pressemitteilung der dgfs Veröffentlichung des Abschlussberichtes auf der Homepage der dgfs	2023 2023
Maßnahme D: Direkter Wissens- transfer	Direkte Information interessierter Unternehmen außerhalb des PA	D1	Vorstellung der Ergebnisse im Rahmen von Besichtigungen	Ab 2023
		D2	Ergebnisse in Kundenpräsentationen von GHI und IBF, Bereitstellung des Abschlussberichtes an interessierte Kunden	
		D3	dgfs-Fachtagungen	Ab 2023
		D4	dgfs-Mitgliederversammlungen sowie div. Arbeitsgruppensitzungen und Fachtagungen	
Maßnahme E: Aus- und Weiterbildung	Ausbildung und Qualifizierung von Studierenden	E1	Integration in die Vorlesung Vorlesung Feuerfeste Bauweisen: Bauweisen und Anlagen (RWTH Aachen, GHI)	ab WS2023
	Weiterbildung von Fachkräften aus der Industrie	E2 E3	Schulungen durch die dgfs Qualifizierungsmaßnahmen durch die dgfs im technisch/konstruktiven Bereich	ab 09/2023

Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Die Umsetzung der Transfermaßnahmen erfolgt fließend ist bereits zum Teil geschehen. Seitens der RWTH Aachen sind die fortlaufende Veröffentlichungen und Vorträge bereits teilweise erfolgt (Unitecr Frankfurt 2023) und weiterhin für 2024 schon eingereicht (ICR Aachen 2024). Aus bisherigen Vorträgen auf Fachkonferenzen lässt sich schlussfolgern, dass das Interesse an derartigen Messtechniken und industrienahen Ergebnissen weiterhin hoch bleiben wird, so dass alle Transfermaßnahmen dieser Art als sehr gut realisierbar einzuschätzen sind. Wie bisher bereits wird über Projekt und daraus resultierende neue Ergebnisse in der Branchenzeitschrift dgfs–Echo sowie auf den Mitgliederversammlungen der DGFS berichtet werden. Eine Zusage der DGFS Geschäftsleitung hierüber liegt bereits vor und ist somit realisierbar. Aber auch

Veröffentlichungen und Vorträge innerhalb von anderen Verbänden und Gremien, denen die Projektpartner zugehörig sind (bspw. DKG, Normungsinstitut/DIN), sind angestrebt und sehr wahrscheinlich. Im Bereich der Aus- und Weiterbildung sind die Erkenntnisse dieses Vorhabens bereits in die Vorlesung „Feuerfeste Bauweisen“ an der RWTH Aachen eingeflossen. Innerhalb der DGFS ist eine Arbeitsgruppe aus Industrievertretern (KMU) gebildet worden, die sich in Zukunft mit den thermo-mechanischen Spannungsberechnungen im Feuerfestbau und der Datenermittlung befassen wird. Auch hierfür werden Ergebnisse und Methoden dieses Vorhabens angewendet und somit weitere Daten und Erkenntnisse ausgetauscht werden.

5 Literaturverzeichnis

- [1] http://www.krosaki.co.jp/english/taika/t1/t_1_8_2.html, Zuletzt Abgerufen: 01.04.2019
- [2] C.A. Schacht (Ed.), *Refractories handbook*, Dekker, New York, NY, 2004.
- [3] M. Kuna, *Numerische Beanspruchungsanalyse von Rissen: Finite Elemente in der Bruchmechanik ; mit zahlreichen Beispielen, second., verb. Aufl., Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2010.*
- [4] <https://www.rhimagnesita.com/de/>; Zuletzt Abgerufen: 01.04.2019
- [5] D.R. Kreuzer, C. Wagner, G. Unterreiter, J. Schmidl, *Refractory Design and the Role of Numerical Simulation*, in: B.R. Davis, M.S. Moats, S. Wang, D. Gregurek, J. Kapusta, T.P. Battle, M.E. Schlesinger, G.R. Alvear Flores, E. Jak, G. Goodall, M.L. Free, E. Asselin, A. Chagnes, D. Dreisinger, M. Jeffrey, J. Lee, G. Miller, J. Petersen, V.S.T. Ciminelli, Q. Xu, R. Molnar, J. Adams, W. Liu, N. Verbaan, J. Goode, I.M. London, G. Azimi, A. Forstner, R. Kappes, T. Bhambhani (Eds.), *Extraction 2018*, Springer International Publishing, Cham, 2018, pp. 159–173.
- [6] K. Andreev, H. Harmuth, *FEM simulation of the thermo-mechanical behaviour and failure of refractories—a case study*, *Journal of Materials Processing Technology* 143-144 (2003) 72–77.
- [7] P.B. Lourenço, G. Milani, A. Tralli, A. Zucchini, *Analysis of masonry structures: Review of and recent trends in homogenization techniques*, *Can. J. Civ. Eng.* 34 (2007) 1443–1457.
- [8] C. Wu, H. Hao, *Derivation of 3D masonry properties using numerical homogenization technique*, *Int. J. Numer. Meth. Engng* 66 (2006) 1717–1737.
- [9] A. Zucchini, P.B. Lourenço, *Mechanics of masonry in compression: Results from a homogenisation approach*, *Computers & Structures* 85 (2007) 193–204.
- [10] K. Andreev, Sido Sinnema, A. Rezik, Samir Allaoui, Eric Blond, A. Gasser, *Compressive behaviour of dry joints in refractory ceramic masonry.*
- [11] T.M.H. Nguyen, E. Blond, A. Gasser, T. Prietl, *Mechanical homogenisation of masonry wall without mortar*, *European Journal of Mechanics - A/Solids* 28 (2009) 535–544.
- [12] A. Gasser, P. Boisse, Y. Dutheillet, J. Poirier, *Experimental and numerical analyses of thermomechanical refractory lining behaviour*, *Proceedings of the IMechE* 215 (2016) 41–54.

- [13] A. Gasser, P. Boisse, J. Rousseau, Y. Dutheillet, Thermomechanical behaviour analysis and simulation of steel/refractory composite linings, *Composites Science and Technology* 61 (2001) 2095–2100.
- [14] K. Andreev, H. Harmuth, Numerische Simulation des mechanischen und thermo-mechanischen Verhaltens der Feuerfestzustellungen von Stahlpfannen, *Proc. of Gesteinshüttenkolloquium, Leoben, Österreich* (2001) 91–99.
- [15] E. Brochen, C. Dannert, P. Pilate, New Perspectives for Investigating the Softening Behaviour of Refractory Products at High Temperature, *refractories worldforum* 7 (2015) 104–110.
- [16] D. Szeliga, J. Gawad, M. Pietrzyk, Inverse analysis for identification of rheological and friction models in metal forming, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 195 (2006) 6778–6798.
- [17] H. Cho, G. Ngalle, T. Altan, Simultaneous Determination of Flow Stress and Interface Friction by Finite Element Based Inverse Analysis Technique 52 (2003) 221–224.
- [18] J. Lohmar, M. Bambach, G. Hirt, T. Kiefer, D. Kotliba, Inverse Modeling Techniques for the Precise Prediction of Rolling Forces and Torques in Heavy Plate Rolling, in: W. Bleck (Ed.), 9th International Rolling Conference and the 6th European Rolling Conference, 2013.
- [19] Myziuk, M.: A relation between adiabatic and isothermal Moduli, 2014.
- [20] Sone, H.; Zoback, M. D.: Mechanical properties of shale-gas reservoir rocks — Part 1: Static and dynamic elastic properties and anisotropy. *GEOPHYSICS* 5/78, D381-D392, 2013.
- [21] Harten, U.: *Physik, Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [22] Sharpe, W.N. Hrsg.: *Springer handbook of experimental solid mechanics. With 50 tables*. Springer, New York, 2008.
- [23] Callister, W. D.; Rethwisch, D. G.: *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik. Eine Einführung*. Wiley-VCH GmbH, Weinheim, 2020.
- [24] Davarpanah, S. M.; Ván, P.; Vásárhelyi, B.: Investigation of the relationship between dynamic and static deformation moduli of rocks. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources* 1/6, 2020.
- [25] Gere, J. M.; Barry, G. J.: *Mechanics of Materials, Brief ed.*, 2014.

- [26] Gross, D. et al.: Technische Mechanik 2. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [27] Öchsner, A.: Theorie der Balkenbiegung. Einführung und Modellierung der statischen Verformung und Beanspruchung. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016.
- [28] Macherauch, E.; Zoch, H.-W.: Praktikum in Werkstoffkunde. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2019.
- [29] Wegner, S.: Erfassung Grundschulung - 3D-Testing, 2020.
- [30] ZEISS Quality Tech Guide: GOM 3D-Testing - technische Dokumentation.
- [31] Luhmann, T. et al. Hrsg.: Close-range photogrammetry and 3D imaging. De Gruyter, Berlin Boston, 2014.
- [32] Kulisch, W.: Technische Mechanik für Dummies. Wiley-VCH, Weinheim, 2012.
- [33], Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration.
- [34] Martienssen, W.; Warlimont, H.: Springer handbook of condensed matter and materials data. Springer, Heidelberg, New York, 2005.
- [35] Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik. Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., München, 2011.