



Abschlussbericht Lufo VI-1 Projekt Wero_Turb

Sophie-Maria Rauscher



Dokumenteigenschaften

Titel	<u>Abschlussbericht Lufo VI-1 Projekt Wero_Turb</u>
Betreff	<u>Abschlussbericht</u>
Institut	<u>Institut für Test und Simulation von Gasturbinen</u>
Erstellt von	<u>Sophie-Maria Rauscher</u>
Beteiligte	<u>-</u>
Geprüft von	<u>Prof. Dr.-Ing. Stefan Reh</u>
Freigabe von	<u>Prof. Dr.-Ing. Sabine Ardey</u>
Datum	<u>02. Juli 2025</u>
Version	<u>1.0</u>
Dateipfad	<u>-</u>

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Voraussetzungen für das Vorhaben	1
1.3	Planung und Ablauf	2
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	3
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
2	Eingehende Darstellung	6
2.1	Erzielte Ergebnisse	6
2.2	Erläuterung des zahlenmäßigen Nachweises	12
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	12
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit	13
2.5	Relevante Ergebnisse Dritter	13
2.6	Veröffentlichungen	13

1 Kurzdarstellung

Das Projekt Wero_Turb (Werkstoffe und Bauweisen für eine robuste Turbinenauslegung) ist ein Verbundprojekt, das von dem Verbundführer MTU Aero Engines AG (MTU) und den Verbundpartnern DLR, FhG und SKT gemeinsam durchgeführt wird.

Das Projekt wurde im Rahmen des ersten Aufrufs des sechsten zivilen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo VI-1) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) mit dem Förderkennzeichen 20T1923D gefördert.

Das Projekt Wero_Turb wurde von November 2020 bis Oktober 2024 durchgeführt, um die Herausforderungen der robusten Turbinenauslegung zu adressieren.

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die Entwicklung einer neuen FE-Methode für die dynamische Impactsimulation von CMC-Proben. Die Theorie des Phasenfeldbruchs wird verwendet, um das Bruchphänomen aufgrund dynamischer Impakte von Fremdkörpern zu modellieren.

Die Notwendigkeit, eine genaue Berechnungsmethode zu entwickeln, wird dadurch getrieben, dass die Schlagfestigkeit eines neuen CMC-Materials bei verschiedenen Geometrien, Belastungskombinationen und Materialkonfigurationen geprüft werden muss.

Um das Ziel dieses Arbeitspakets zu erreichen, wird das Rechenmodell entwickelt, verifiziert, anhand von Messdaten der Verbundpartner kalibriert und anschließend validiert.

1.2 Voraussetzungen für das Vorhaben

Das DLR hat eine ausgezeichnete Kompetenz und Erfahrung im Modellieren und Simulieren von komplizierten Bruchphänomenen in innovativen Materialien. Die Fachgruppe in DLR-SG hat eine fortschrittliche Finite Elemente Methodik für ausführliche Berechnungsmodelle für dynamische Bruchphänomene in spröden Materialien, wie Riss- und Mikroverzweigung entwickelt. Erfahrungen aus abgeschlossenen und parallel laufenden

DLR-internen, LuFo- und BayLu- Projekten können miteingebracht werden:

- LuFo-Projekt FLUEGGE - Simulation von Rissentwicklung in Zahnrädern
- BayLu- Projekt HiFAL - Schädigungssimulationen von Graphit-Composite
- DLR-Projekt 3DCeraTurb - Lebensdauerabschätzung von CMC-Turbinenschaufeln
- DLR-Projekt KWK MGT - Lebensdauerabschätzung von metallischen Mikrobrennkammern

1.3 Planung und Ablauf

Das Verbundvorhaben Wero_Turb gliedert sich in drei Hauptarbeitspakete, gemäß Projektstrukturplan Abbildung 1.1. Die Laufzeit war vom 01.11.2020 bis zum 31.10.2024. Im Arbeitspaket AP3.2 fanden alle Arbeiten des DLR statt.

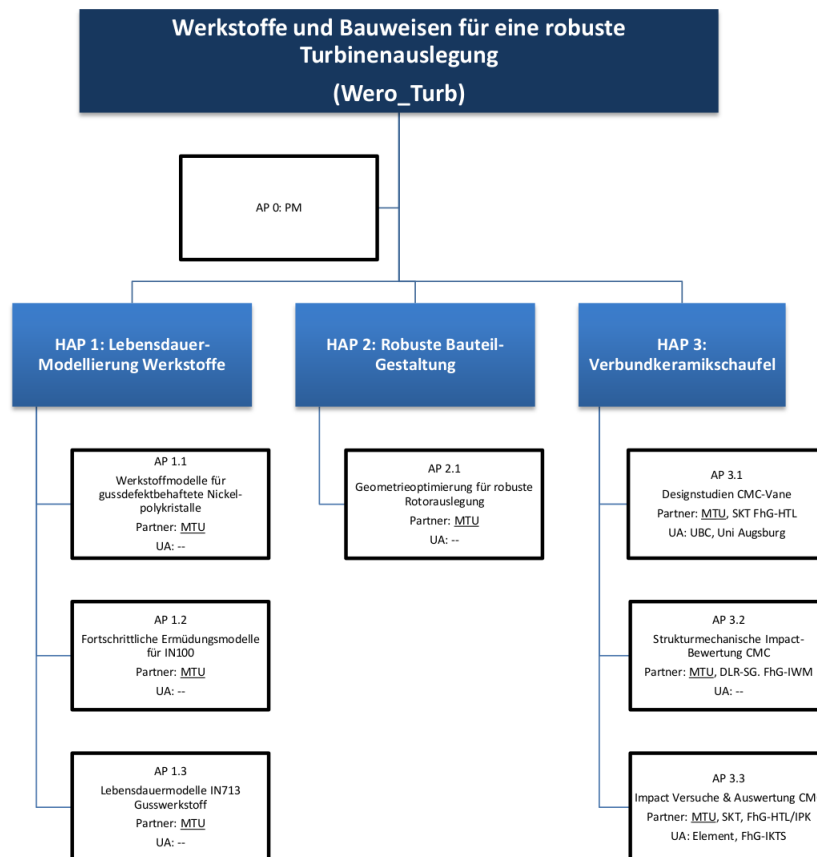


Abbildung 1.1: Gesamtprojektstrukturplan des Verbundvorhabens Wero_Turb

Während der Projektlaufzeit hat es folgende Ereignisse gegeben:

- Das Kick-Off Treffen fand am 02.03.2021 statt.
- Im August 2021 wurden die Projektpartner vom Verbundsführer informiert, dass sich die MTU aus dem CMC-Entwicklungsfeld und aus dem HAP3 des Projektes zurückzieht.
- Ein Änderungsantrag wurde von den Partnern DLR und FhG erarbeitet und am 02.11.2021 eingereicht.
- Zum Jahreswechsel 2021/2022 erfolgte eine Wechsel der Projektleitung auf Seiten des DLR's von Arun Raina zu Sophie-Maria Rauscher.
- Am 07.02.2022 wurde von Seiten des Projektträgers ein Projektstopp verhängt.
- Eine förmliche Anhörung bezgl. des Projektes fand am 05.05.2022 beim BMWK statt.
- Das Projekt wurde am 08.06.2022 vom Projektträger in seiner ursprünglichen Version von 2021 mit minimalen Modifikationen freigegeben.
- Die jährlichen Review Meetings von HAP3 fanden am 06.03.2023 und am 05.06.2024 in einer Video-/Telefonkonferenz statt.
- Das Abschlusstreffen fand am 20.05.2025 in einer Video-/Telefonkonferenz statt.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Eine Herausforderung für die Anwendung von SiC/SiC CMC ist das fehlende Wissen über Konstruktions- und Berechnungsmethoden, um das Materialverhalten bei Bauteilen mit komplexer Geometrie vorhersagen zu können. Ein Verständnis des Fremdkörpereinschlag-Phänomens (FOD) bei hohen Impactgeschwindigkeiten ist von besonderem Interesse für das Design von CMC-Bauteilen im Triebwerksbau [12].

Die Fertigung von SiC/SiC CMC-Bauteilen mit komplexer Geometrie stellt enorme Herausforderungen dar. Chemische Vapor Infiltration, Liquid Polymer Infiltration und Melt Infiltration sind weitgehend erfolgreich nach [17] etabliert. Zu bemerken ist, dass die rechnergestützte Modellierung von CMCs für vorhersagende Simulationen, das Design und die Analyse wenig Beachtung in der Wissenschaft gefunden hat.

Diverse Veröffentlichungen [3, 5, 8, 7, 16] zur Modellierung von SiC/SiC CMC's wurde schon publiziert, aber nicht im Zusammenhang mit Impact. Ein orthotropisches Materialmodell basierend auf der Schädigungsmechanik des Kontinuums wird in [3, 8, 16] entwickelt, um den finalen Bruch zu berücksichtigen.

Die neueste Veröffentlichung von [14] untersucht die Impactfestigkeit von flachen und gekrümmten SiC/SiC CMCs mit FOD Experimenten bei einer Aufprallgeschwindigkeit von $340 \frac{m}{s}$ und validiert die damit korrespondierende Simulation. Ihre Studien schlussfolgern, dass flache Proben einen höheren Schaden erleiden als gekrümmte und dies in der Konstruktionsphase berücksichtigt werden muss. Nach [14] wird ein mikromechanisches Modell verwendet, um die Eigenschaften des Laminates abzuleiten, und ein kohäsives Zonenmodell (CZM) wird verwendet, um die Delamination und die Schädigung zu modellieren. Die Kegelrissbildung wurde als Hauptschädigung identifiziert. Da die Experimente in [14, 19] bei einer festen Geschwindigkeit durchgeführt worden sind, sind keine dynamischen, also ratenabhängigen Eigenschaften bei der Modellierung berücksichtigt.

Weitere experimentelle Untersuchungen bei Impact-Tests mit SiC/SiC CMCs können in [6, 20] gefunden werden. Impact-Tests werden in [6] bei Raumtemperatur und bei 1314C durchgeführt. Es wird dargelegt, dass bei höheren Temperaturen und höheren Aufprallgeschwindigkeiten ein geringerer Impactwiderstand zu erwarten ist. Daraus lässt sich eine Notwendigkeit schlussfolgern, dass ratenabhängige Materialparameter eingebaut werden müssen. Auch wird die Kegelrissbildung auf der Einschlagseite als Typus für das Materialversagen beobachtet. Die Hochgeschwindigkeits-Impact-Versuche beschrieben in [20] wurden bei eine Temperatur von 1000°C durchgeführt. Es wird beobachtet, dass bei 1000°C die Oxidation die Faser-Matrix-Verbindung verstärkt. Dies führt vorrangig zu einem Matrixversagen begleitet von einem Faserbruch.

Die komplizierten Schadensmodi in CMC und ihre Ursprünge werden im Detail in [11, 9] studiert. Ein erweitertes Versagenskriterium ist erforderlich, um physikalisch korrekte Simulationen zu ermöglichen. Das LaRC04-Versagenskriterium, wie in [13] vorgeschlagen, wird als Ausgangspunkt zur Entwicklung angesehen, da es einen umfassenden Bereich an Belastungskombinationen abdeckt. Aus der „world-wide failure exercise“ in [18] stammt das LaRC04-Kriterium.

Die Herausforderungen in der Entwicklung einer FE-Simulation für Impact-Versuche an spröden Materialien können in der renommierten Arbeit von [2] gefunden werden. Die Schockwellen aufgrund von Impact können zu einem Auftreten von vielfachen Rissinitierungen führen. Deswegen ist es äußerst wichtig, die Robustheit und die Stabilität der zugrunde liegenden numerischen Methode zu gewährleisten.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt ist Teil des Gesamtverbunds Wero_Turb und kooperierte mit den zugehörigen Teilprojekte von MTU Aero Engines, Schunk Kohlenstofftechnik und den Fraunhofer-Instituten IWM und ISC/HTL. Dies ermöglichte den Austausch von Fachwissen.

Das SiC/SiC CMC-Material wurde von SKT hergestellt, dessen Ziel die Optimierung der Prozessparameter ist. Das entwickelte Material wurde vom Verbundspartner FhG einer Reihe von Zug- und Impact-Versuchen unterzogen.

Parallel dazu arbeiteten das DLR und das FhG (AP 3.2) an fortschrittlichen numerischen Methoden für die Simulation von Experimenten.

In dem hier beschriebenen Verbundprojekt gab es keine weiteren Kooperationen mit anderen Verbundvorhaben oder assoziierten Partnern. Es gab auch keine Unterbeauftragungen. Das gesamte Arbeit hat das Ziel die Entwicklung und die Optimierung des SiC/SiC CMC-Materials voranzutreiben.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

In diesem Projekt wurde eine FE-Methodik entwickelt, um die Schädigungsbilder von CMC-Bauteilen aufgrund von Impactschadensfällen genau und detailliert abzubilden. Dafür wurde der FE-Code um die unten angefügten Punkte und Funktionalitäten erweitert, um die im Rahmen des Projekts gestellten Aufgaben umsetzen zu können.

Für die mechanische Rechnung wurde ein Kriterium implementiert, um die Rissentstehung und das Risswachstum zu bewerten, das LARC04-Kriterium. Das LARC04 Kriterium bewertet die Spannungen in Richtung der Faserorientierung des Materials, ob diese zum Versagen führen oder nicht. Um diese Bewertung durchführen zu können, müssen die Spannungen vom globalen Bauteilkoordinatensystem mit Hilfe einer Rotationsmatrix in das lokale, ortabhängige Materialkoordinatensystem, das die Faserrichtungen beschreibt, transformiert werden.

Das LARC04-Kriterium von Pinho [13] ist ein Kriterium-Set, das verwendet wird, um die Schädigung von Faserverbundmaterialien unter in-plane oder dreidimensionalem Stresszustand zu bewerten. Es beinhaltet speziell die Auswirkungen von Shear-Non-Linearity und In-Plane-Stress.

Das Kriterium besteht aus sechs Fällen, die jeweils wie folgt definiert sind:

- Faserbruch bei Zugbelastung in Faserrichtung
- Faserbruch bei Druckbelastung in Faserrichtung
- Matrixbruch bei Zugbelastung quer zur Faserrichtung
- Matrixbruch bei Druckbelastung quer zur Faserrichtung
- Matrixbruch bei Druckbelastung quer zur Faserrichtung mit Kinking
- Matrixbruch bei Zugbelastung quer zur Faserrichtung mit Kinking

Unter Kinking wird die Schädigung des Komposites verstanden, das eine Kombination aus Mikrobeulen einzelner Fasern und eines Scherversagens der gesamten Probe ist.

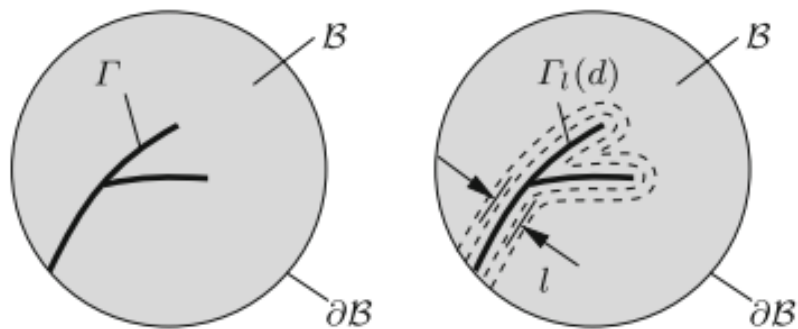


Abbildung 2.1: Scharfe (a) und diffusive (b) Risstopologie in einem Körper B , Quelle: Hofacker und Miehe [10]

Die Phasenfeldmethode stellt einen Ansatz zur Modellierung von Rissen dar. Im Gegensatz zur Theorie der linearen Bruchmechanik bietet sie einen einheitlichen Rahmen zur Modellierung von Rissinitiierung und Risswachstum und ermöglicht darüber hinaus die Beschreibung komplexer Rissmuster, welche durch Abknicken und Verzweigen von Rissen entstehen können.

Das Phasenfeldkonzept zur Modellierung von Rissinitiierung und -wachstum beruht auf dem Prinzip der globalen Minimierung der Gesamtenergie. Für Details wird auf Hofacker und Miehe [10] verwiesen.

Betrachtet wird ein skalares Feld, das sogenannte Phasenfeld, welches den Zustand bzw. die Schädigung eines betrachteten Materialkörpers lokal beschreibt. Das orts- und zeitabhängige Phasenfeld nimmt Werte im Intervall von $[0,1]$ an, wobei 0 bedeutet, dass der Körper im Punkt zum Zeitpunkt vollständig intakt ist und 1 einen vollständig gebrochenen Zustand („gerissen“) beschreibt.

Das Konzept der Phasenfeldmodellierung beruht auf der Idee, die Topologie eines scharfen Risses durch eine diffusive Risstopologie, gegeben durch das von abhängige Funktional zu approximieren. Dabei ist l ein Parameter, der zur Skalierung dient. Dies ist in Abbildung 2.1 für einen Materialkörper veranschaulicht, vgl. Hofacker und Miehe [10].

Diese Approximation ist sinnvoll, denn das regularisierte Rissmodell der Phasenfeldmethode konvergiert für $l \rightarrow 0$ gegen das bruchmechanische Modell mit einer scharfen Rissspitze. Die Phasenfeldvariable ergibt sich als Lösung des Variationsprinzips unter der Bedingung bzw. als Lösung der dazu äquivalenten Euler Gleichungen.

Um die Ergebnisse der FE-Simulation zu validieren, wurden Zugversuche durchgeführt, die von dem Projektpartner Fraunhofer ISC/Zentrum HTL [1] bereitgestellt wurden. Für das Modell wurde eine normierte Probe nach ASTM C1359-13 verwendet und die Randbedingungen wie in Abbildung 2.2 dargestellt.

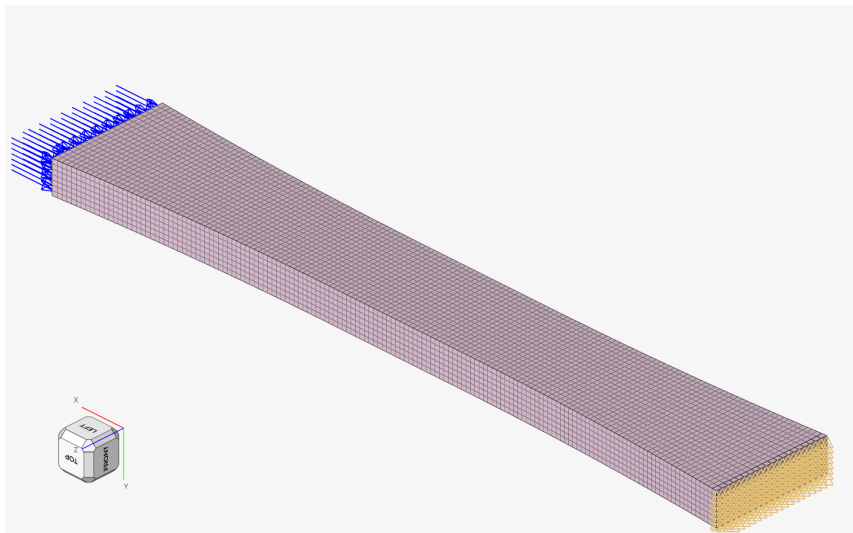


Abbildung 2.2: Modell für die Simulation der Zugversuche

Für die Validierung unserer Simulation wurden die Proben Z2-2 und Z2-4 aus [1] ausgewählt, da alle anderen Zugversuche nicht verwendbar waren. In Abbildung 2.3 werden die Ergebnisse der Proben Z2-1 bis Z2-5 aus dem Forschungsbericht der Fraunhofer Institute gezeigt. Die Kurvenverläufe für die Proben Z2-1 und Z2-3 zeigen keine Dehnung und sind deshalb nicht auswertbar. Der Kurve für die Probe Z2-5 zeigt einen anomalen Verlauf, der ebenfalls nicht auswertbar ist.

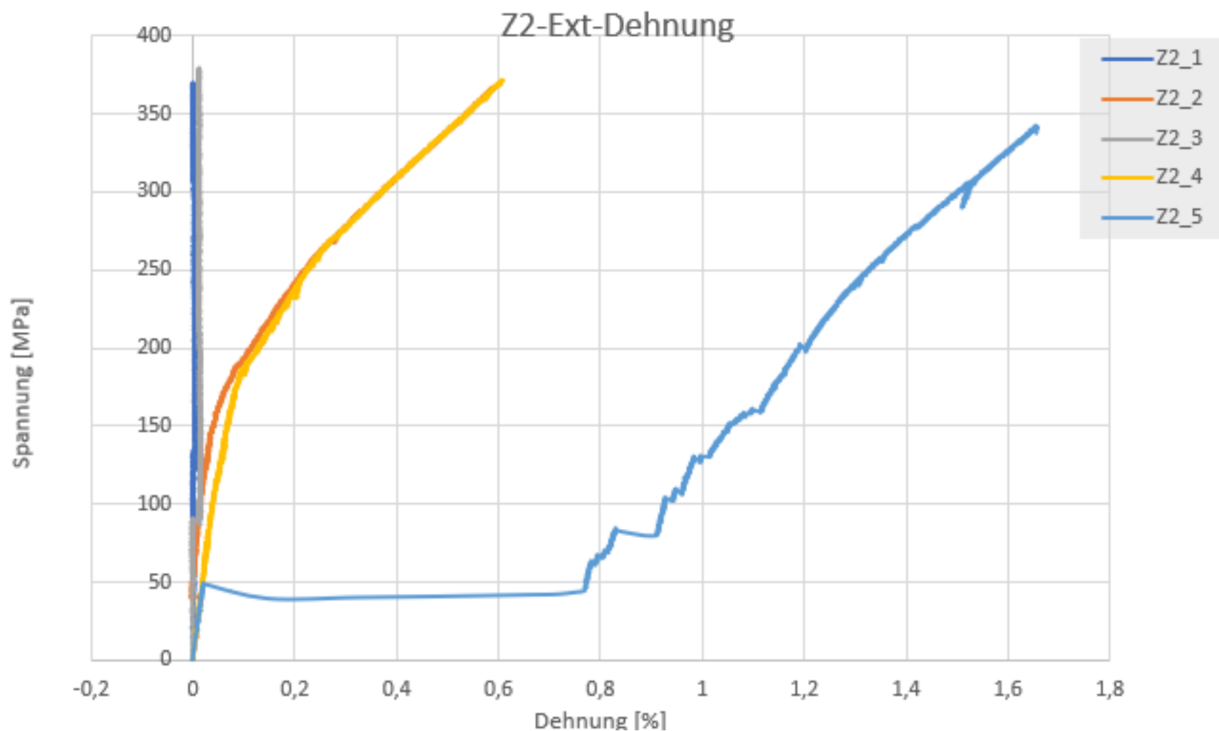


Abbildung 2.3: Experimentelle Spannungs-Dehnungs-Kurven aus Zugversuchen von CMC SiC/SiC, Quelle: Fraunhofer ISC/HTL [1]

In Abbildung 2.4 sind die Ergebnisse der Simulation mit den Experimenten in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm gegeneinander aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell primär mit der Phasenfeld-Methode abgebildet werden kann. Der rein elastische Bereich des Verlaufs (bis ca. 50 – 100 MPa) wird sehr genau getroffen, aber es zeigt sich auch Diskrepanzen im anschließenden Bereich der Schädigung. Die Materialzähigkeit G_c ist der ausschlaggebende Materialparameter der Phasenfeldmodellierung. Bei einem Wert von $1500 \frac{N}{mm}$ wird der Verlauf der Schädigung gut wiedergegeben, aber die Probe reißt zu früh. Bei einem Wert von $5000 \frac{N}{mm}$ reißt die Probe nahezu bei der gleichen Dehnung von 0.55% wie im Experiment. Jedoch werden die Spannungen bei weitem überschritten. Um den Verlauf genau abbilden zu können, sind weitere Forschungsaktivitäten erforderlich. Da dieser Arbeit nur der vorläufige Forschungsbericht des des Verbundpartners FhG ohne Bilder der gerissenen Proben zugrunde liegt, konnte ein Vergleich zwischen Experiment und Simulation hinsichtlich des Rissverlaufes nicht vorgenommen werden.

Für die Impact-Simulation wurde der Versuchsaufbau nach [15] in Abbildung 2.6 modelliert, da keine Informationen zu den Impactversuchen im Projekt bekannt sind. Auch konnte kein Vergleich zur Realität vorgenommen werden. In Abbildung 2.7 wird der

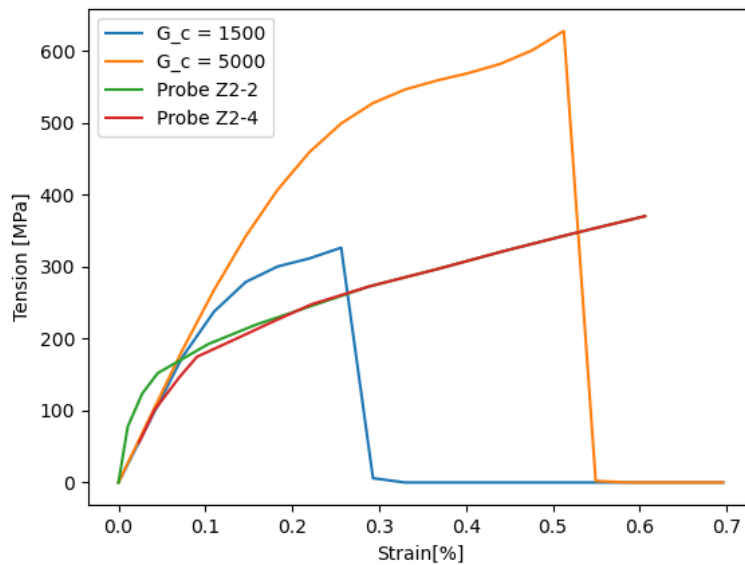


Abbildung 2.4: Spannungs-Dehnungs-Kurven von Simulation mit $G_c = 1500 \frac{N}{mm}$ und mit $G_c = 5000 \frac{N}{mm}$ sowie aus experimentellen aus Zugversuchen von CMC SiC/SiC, Quelle Experiment: Fraunhofer ISC/HTL [1]

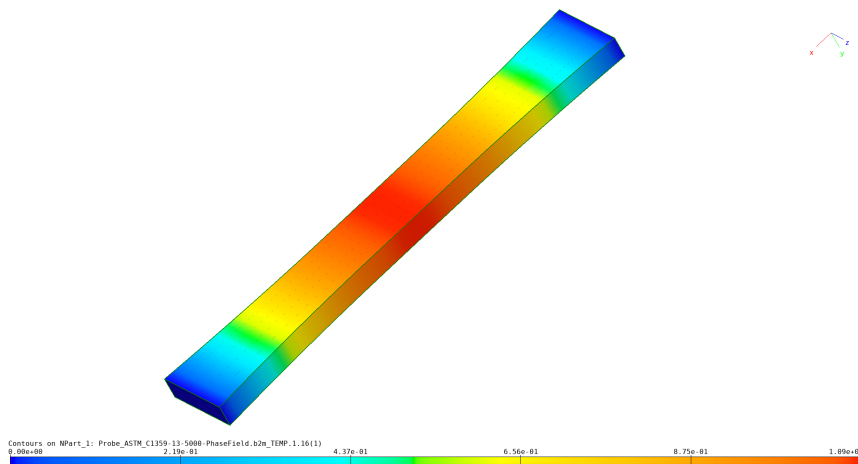


Abbildung 2.5: Darstellung des Bruches der Zugversuchprobe an Hand der Simulation mit $G_c = 1500 \frac{N}{mm}$

aufgebrachte Kraftverlauf auf die Probe gezeigt, deren Form [15] nachempfunden ist. In Abbildung 2.8 erstreckt sich der Bereich in dem der Phasenfeldparameter in der Nähe von 1.0 liegt über eine größere kreisförmige Fläche. Wie oben erläutert, bedeutet das, dass der Durchschlag durch das Material mit der Phasenfeldmethode modelliert werden kann.

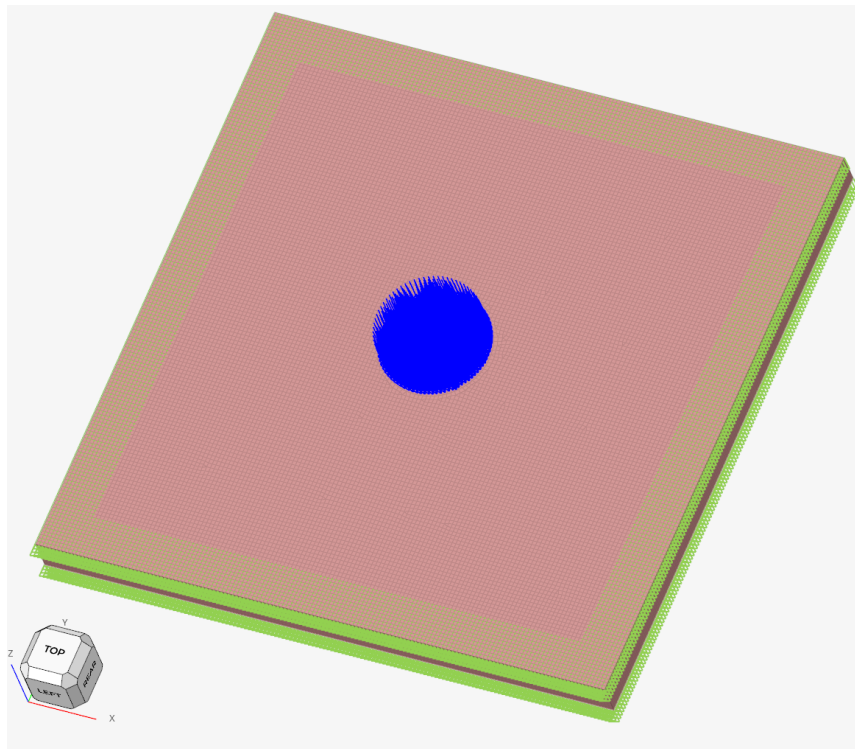


Abbildung 2.6: Simulationsmodell für den Impact-Versuch

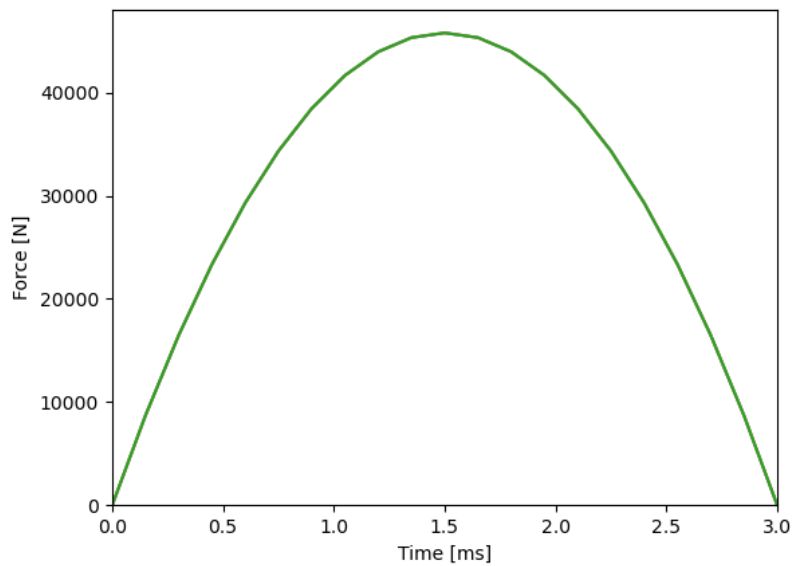


Abbildung 2.7: Aufgebrachter Kraftverlauf während der Impactsimulation, um den Energieeintrag durch das Projektil zu beschreiben

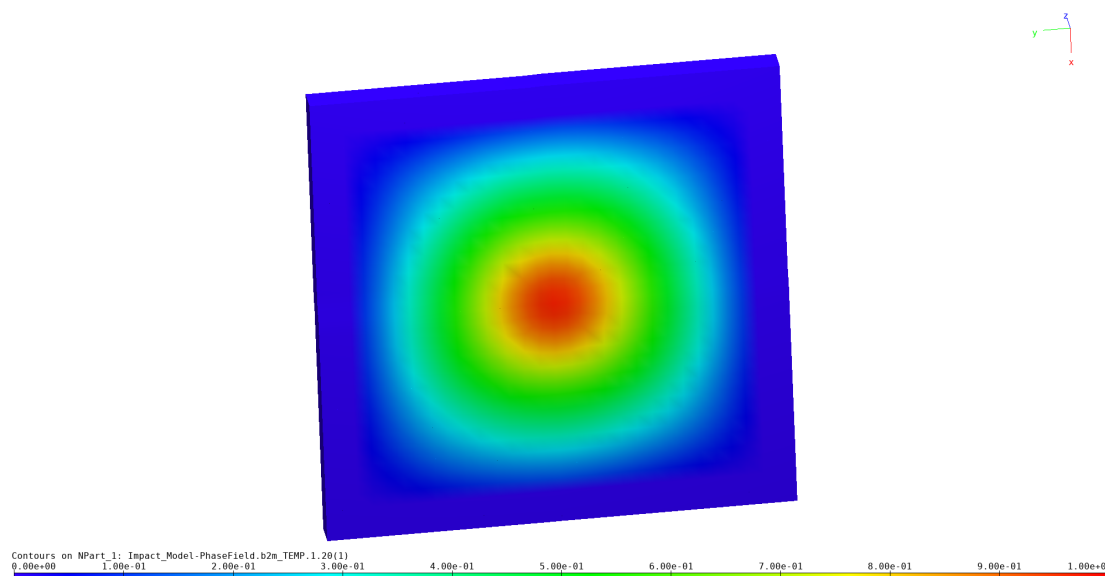


Abbildung 2.8: Dargestellte Schädigung der Probe durch den Impact, modelliert mit der Phasenfeldmethode

2.2 Erläuterung des zahlenmäßigen Nachweises

Im Projektverlauf sind hauptsächlich Kosten für Personal angefallen. Dabei wurden die genehmigten, vorkalkulierten Gesamtkosten in keiner Kostenart überschritten. Die Kosten setzen sich wie folgt zusammen:

- Primär etwa 230000 € für Personalkosten, mit denen die dargestellten wissenschaftlich/technischen Ergebnisse erzielt wurden.
- Etwa 350 € an Reisemitteln für die Teilnahme am Kick-Off Meeting. Weitere Reisen fanden aufgrund der COVID-19 Pandemie nicht statt.

Die exakten Zahlen sind bitte dem Schlussverwendungsnachweis zu entnehmen.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aufgrund des Charakters einer Forschungsstelle kann das DLR nicht von den erzielten Ergebnissen direkten wirtschaftlichen Nutzen ziehen. Die Verwertungen sind jedoch hauptsächlich von akademischer Natur und zielen darauf ab, das erreichte Wissen und die Fähigkeit zur Modellierung von Schädigungen in Form von Rissen in keramischen Komposits sowie der Erfahrungen mit hochdynamischen Simulationen für Impact weiter zu vertiefen.

Diese Forschungslinien sind insbesondere für die Entwicklung von industriell nutzbaren Modellen zur Schadensvorhersage relevant. Durch diese Arbeit kann die Kompetenz des DLR's in diesem Bereiche weiter verstärkt werden, worurch die weitere Projektakquise erleichtert wird.

Durch das Vorhaben wurde zudem wissenschaftlicher Nachwuchs ausgebildet, insbesondere durch Studentenabschlussarbeiten und Hilfstätigkeiten. Darüber hinaus fördert das DLR die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen durch eine qualitativ hochwertige Ausbildung junger Ingenieurinnen und Ingenieure nachhaltig.

Das DLR trug somit einen wichtigen Beitrag zur aktuellen Forschung auf den betreffenden Gebieten bei und erweitert sein internationales Forschungsnetzwerk.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Die erlangten Erkenntnisse wurden und werden im Anschluss an die Projektlaufzeit weiterentwickelt und in weiterführenden Forschungstätigkeiten übertragen.

Nicht zuletzt erweitert der Standort Deutschland im Zuge dieses Vorhabens die Kompetenzen im Bereich der keramischen Faserverbundwerkstoffe.

2.5 Relevante Ergebnisse Dritter

Im Bereich der Impactsimulationen sind in den letzten Jahren keine relevanten Ergebnisse Dritter gefunden worden.

2.6 Veröffentlichungen

Aufgrund der vielen offenen Fragestellungen waren keine Veröffentlichungen möglich.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Gesamtprojektstrukturplan des Verbundvorhabens Wero_Turb	2
2.1	Scharfe (a) und diffusive (b)Risstopologie in einem Körper B, Quelle: Hofacker und Miehe [10]	7
2.2	Modell für die Simulation der Zugversuche	8
2.3	Experimentelle Spannungs-Dehnungs-Kurven aus Zugversuchen von CMC SiC/SiC, Quelle: Fraunhofer ISC/HTL [1]	9
2.4	Spannungs-Dehnungs-Kurven von Simulation mit $G_c = 1500 \frac{N}{mm}$ und mit $G_c = 5000 \frac{N}{mm}$ sowie aus experimentellen aus Zugversuchen von CMC SiC/SiC, Quelle Eperiment: Fraunhofer ISC/HTL [1]	10
2.5	Darstellung des Bruches der Zugversuchprobe an Hand der Simulation mit $G_c = 1500 \frac{N}{mm}$	10
2.6	Simulationsmodell für den Impact-Versuch	11
2.7	Aufgebrachter Kraftverlauf während der Impactsimulation, um den Ener- gieeintrag durch das Projektil zu beschreiben	11
2.8	Dargestellte Schädigung der Probe durch den Impact, modelliert mit der Phasenfeldmethode	12

Literatur

- [1] Wero_Turb Zugversuche - vorläufiger Prüfbericht. Fraunhofer ISC/Zentrum HTL.
- [2] G. Camacho and M. Ortiz. Computational modelling of impact damage in brittle materials. *International Journal of Solids and Structures*, 33(20–22):2899–2938, Aug. 1996. ISSN 0020-7683. doi: 10.1016/0020-7683(95)00255-3.
- [3] G. Camus. Modelling of the mechanical behavior and damage processes of fibrous ceramic matrix composites: application to a 2-d sic/sic. *International Journal of Solids and Structures*, 37(6):919–942, Feb. 2000. ISSN 0020-7683. doi: 10.1016/s0020-7683(99)00065-7.
- [4] W. Cantwell and J. Morton. The impact resistance of composite materials — a review. *Composites*, 22(5):347–362, Sept. 1991. ISSN 0010-4361. doi: 10.1016/0010-4361(91)90549-v.
- [5] L. Chen, X. Yao, and S. Cen. Predictions of elastic property on 2.5d c/sic composites based on numerical modeling and semi-analytical method. *Composites Part B: Engineering*, 74:53–65, June 2015. ISSN 1359-8368. doi: 10.1016/j.compositesb.2015.01.009.
- [6] S. R. Choi. Foreign object damage phenomenon by steel ball projectiles in a sic/sic ceramic matrix composite at ambient and elevated temperatures. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(9):2963–2968, Sept. 2008. ISSN 1551-2916. doi: 10.1111/j.1551-2916.2008.02498.x.
- [7] C. Cluzel, E. Baranger, P. Ladevèze, and A. Mouret. Mechanical behaviour and lifetime modelling of self-healing ceramic-matrix composites subjected to thermo-mechanical loading in air. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(8):976–984, Aug. 2009. ISSN 1359-835X. doi: 10.1016/j.compositesa.2008.10.020.
- [8] J. de Vree, W. Brekelmans, and M. van Gils. Comparison of nonlocal approaches in continuum damage mechanics. *Computers Structures*, 55(4):581–588, May 1995. ISSN 0045-7949. doi: 10.1016/0045-7949(94)00501-s.
- [9] A. EVANS, F. ZOK, and J. DAVIS. The role of interfaces in fiber-reinforced brittle matrix composites. *Composites Science and Technology*, 42(1–3):3–24, 1991. ISSN 0266-3538. doi: 10.1016/0266-3538(91)90010-m.
- [10] M. Hofacker and C. Miehe. A phase field model of dynamic fracture: Robust field updates for the analysis of complex crack patterns. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 93(3):276–301, July 2012. ISSN 1097-0207. doi: 10.1002/nme.4387.

- [11] D. MARSHALL and A. G. EVANS. Failure mechanisms in ceramic-fiber/ceramic-matrix composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 68(5):225–231, May 1985. ISSN 1551-2916. doi: 10.1111/j.1151-2916.1985.tb15313.x.
- [12] R. R. Naslain. Sic-matrix composites: Nonbrittle ceramics for thermo-structural application. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2(2):75–84, Mar. 2005. ISSN 1744-7402. doi: 10.1111/j.1744-7402.2005.02009.x.
- [13] S. Pinho, C. Davila, L. Iannucci, and P. Robinson. Failure models and criteria for frp under in-plane or three-dimensional stress states including shear non-linearity. Mar. 2005.
- [14] M. J. Presby, R. Mansour, K. Manigandan, G. N. Morscher, F. Abdi, C. Godines, A. Eftekharian, and S. R. Choi. Characterization and simulation of foreign object damage in curved and flat sic/sic ceramic matrix composites. *Ceramics International*, 45(2):2635–2643, Feb. 2019. ISSN 0272-8842. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.10.207.
- [15] Y. Shi, T. Swait, and C. Soutis. Modelling damage evolution in composite laminates subjected to low velocity impact. *Composite Structures*, 94(9):2902–2913, Sept. 2012. ISSN 0263-8223. doi: 10.1016/j.compstruct.2012.03.039.
- [16] A. Shojaei, G. Li, J. Fish, and P. Tan. Multi-scale constitutive modeling of ceramic matrix composites by continuum damage mechanics. *International Journal of Solids and Structures*, 51(23–24):4068–4081, Nov. 2014. ISSN 0020-7683. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2014.07.026.
- [17] M. Singh, T. Ohji, S. Dong, D. Koch, K. Shimamura, B. Clauss, B. Heidenreich, and J. Akedo, editors. *Advances in High Temperature Ceramic Matrix Composites and Materials for Sustainable Development; Ceramic Transactions, Volume CCLXIII*. Wiley, May 2017. ISBN 9781119407270. doi: 10.1002/9781119407270.
- [18] P. Soden, A. Kaddour, and M. Hinton. Recommendations for designers and researchers resulting from the world-wide failure exercise. *Composites Science and Technology*, 64(3–4):589–604, Mar. 2004. ISSN 0266-3538. doi: 10.1016/s0266-3538(03)00228-8.
- [19] X.-P. Xu and A. Needleman. Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 42(9):1397–1434, Sept. 1994. ISSN 0022-5096. doi: 10.1016/0022-5096(94)90003-5.
- [20] S. Yashiro, K. Ogi, and M. Oshita. High-velocity impact damage behavior of plain-woven sic/sic composites after thermal loading. *Composites Part B: Engineering*, 43(3):1353–1362, Apr. 2012. ISSN 1359-8368. doi: 10.1016/j.compositesb.2011.11.021.