

Schlussbericht

F&E-Projekt Hy-FiVE

Teilvorhaben Hy-FiVE-5

Partner:	Förderkennzeichen:
ar engineers GmbH	03SX511F
Vorhabenbezeichnung:	
<i>„Entwicklung von Entwurfs- und Berechnungsmethoden für klebfreie, hybride Füge-technologien in maritimen Strukturen“</i>	
Laufzeit des Vorhabens:	
01.05.2020 – 31.12.2023	
Berichtszeitraum:	
01.05.2020 – 31.12.2023	

Erstellt von:

Name: Luiz Lise, M.Sc.
Fabian Nowacki, M.Sc.

Datum: 28.06.2024

Inhaltsverzeichnis

1	Beschreibung des Verbundprojekts Hy-FiVE	4
1.1	Stand der Technik	5
	Literaturangaben zum Stand der Technik	6
1.2	Ziele des Teilvorhabens	8
1.3	Planung und Ablauf	8
1.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
2	Arbeitspakete & Ergebnisse	10
2.1	AP100: Anforderung und Evaluierung Fügetechnologien	10
2.2	AP200: Berechnung & Design	15
2.2.1	Mikromechanische Analyse	16
2.2.2	Makromechanik	25
2.2.3	Schweißsimulationen	29
2.3	AP 500: Optimierung Berechnung & Design	31
2.3.1	Demonstratorentwurf	32
2.3.2	Konzipierung des globalen Modellierungsprozesses	32
2.4	Evaluierung im Schiffbau-Maßstab	34
3	Zusammenfassung & Fazit	39
	Literaturverzeichnis	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bewertete Technologien/Verbindungskonzepte in Hy-FiVE	11
Abbildung 2: FAUSST-Verbinder mit angeschweißtem Metallteil [Hyconnect GmbH].....	15
Abbildung 3: Der Multiskalen-Ansatz zur Charakterisierung der Hybridverbindung	16
Abbildung 4: Ein repräsentatives Volumenelement (RVE) eines unidirektional faserverstärkten Kunststoffes	18
Abbildung 5: Verschiedene Varianten des FAUSST-Textils [Fritz Moll Textilwerke GmbH & Co. KG].....	18
Abbildung 6: Detailaufnahme des FAUSST-Textils (links) und in TexGen modellierte Gewirkstruktur (rechts).....	19
Abbildung 7: Voxelnetz der FAUSST-Gewirkstruktur (Bereich des reinen Glasfasergewirks)	20
Abbildung 8: Spannungsverteilung in der FAUSST-Gewirkstruktur	20
Abbildung 9: Abbildung eines RVEs als CAD-Geometrie (oben) und FE-Netz (unten)	21
Abbildung 10: Einheitslastfälle zur Bestimmung der Grundelastizitätsgrößen am RVE	22
Abbildung 11: Unterteilung der berechneten Materialzonen im FAUSST-Verbinder	22
Abbildung 12: Probekörper für a) Zugversuche und b) Druckversuche	26
Abbildung 13: Spannungs-Dehnungsdiagramm mit Schädigungsmodell.....	27
Abbildung 14: Spannungs-Dehnungsdiagramm des Glasbereichs	28
Abbildung 15: Spannungs-Dehnungsdiagramm des Hybridbereichs	29
Abbildung 16: 3D-Modell für thermische Simulationen am FAUSST-Verbinder	30
Abbildung 17: 3D-Simulationsergebnisse der Wärmeleitung im FAUSST-Verbinder.....	31
Abbildung 18: Prinzipdarstellung globales FE-Modell eines FVK-Schanzkleids.....	33
Abbildung 19: Prinzipdarstellung globales FE-Modell mit FAUSST-Fügezone	33
Abbildung 20: Materialzuweisungen im FAUSST-Demonstratormodell	35
Abbildung 21: Aufbau des Hybridmaterials im FAUSST-Demonstratormodell	36
Abbildung 22: Design-Parameter im Materialaufbau des FAUSST-Demonstratormodells ...	37
Abbildung 23: Beispielhafte Kräfteinwirkungen auf das FAUSST-Demonstratormodell	37
Abbildung 24: Post-Processing der Simulationsergebnisse im FAUSST-Demonstratormodell	38

1 Beschreibung des Verbundprojekts Hy-FiVE

Der vermehrte Einsatz von Leichtbaustrukturen in verschiedenen Industrien trägt direkt zum Klimaschutz durch CO₂-Einsparung und Ressourcenschonung bei. Der Einsatz von Leichtbaumaterialien im Schiffbau, vorwiegend Faserverbundkunststoffen (FVK) mit duroplastischer Matrix, schreitet voran und ist unerlässlich. Neue, branchenübergreifende Entwicklungen in der Produktionstechnik und im Brandschutz fördern die breite Anwendung von Leichtbaustrukturen. Dennoch bestehen viele Schiffstrukturen weiterhin aus Stahl und Aluminium, weshalb Fügetechnologien zwischen FVK und Metall entscheidend sind. Das Kleben als Fügetechnologie ist aufgrund großer Hürden in der Abnahme durch Prüfinstitutionen für den Schiffbau derzeit nur bedingt geeignet. Die Komplexität in Vorbereitung und Durchführung sowie mangelnde Möglichkeiten zur zerstörungsfreien Prüfung machen Klebverbindungen problematisch. Alternativen sind stoff- und formschlüssige Verbindungen ohne Zusatzwerkstoff, die Fertigungsaufwand und Zertifizierungszeit reduzieren. Diese Methoden wurden bisher nur an kleinen Bauteilen getestet und nicht im Schiffbau eingesetzt. Es ist notwendig, die Auswirkungen auf alle Lebenszyklen des Schiffbaus zu untersuchen.

Ziel des Verbundprojekts Hy-FiVE ist es, klebefreie Fügetechnologien für den Schiffbau zu identifizieren, zu entwickeln, zu evaluieren und zu demonstrieren. Der zukünftige Einsatz solcher Verbindungen kann die Nutzung von Leichtbaumaterialien im Schiffbau fördern, Prozesszeiten verkürzen und neue Designs ermöglichen. Die Integration klebefreier Verbindungen vereinfacht damit die Umsetzung von Leichtbaukonzepten und kann Zulassungshürden merklich reduzieren. Der angestrebte Fortschritt dieses Projektes bezieht sich maßgeblich auf die Weiterentwicklung und Evaluierung von klebefreien hybriden Fügetechnologien, insbesondere auf die Methodik und verbundene Prozesse. Die Bedürfnisse und Anforderungen des Schiffbaus werden den verfügbaren Systemen gegenübergestellt, evaluiert und Weiterentwicklungen identifiziert und durchgeführt.

Verschiedene Fügeanforderungen der Strukturen werden entsprechenden Füge-systemen zugewiesen. Dabei werden unter anderem folgende Gesichtspunkte in der Entwicklung berücksichtigt:

- Design- und Prüfmetho-den
- Produktionsprozess
- Demonstration und Test

- Optimierung
- Wirtschaftlichkeit

Ziel ist eine klare Beurteilung der Einsatzfähigkeit der Fügesysteme für die schiffbaulichen Anforderungen und deren Dokumentation in der Anwendung. Ebenfalls soll die Methodik zur Nachweisführung und Zertifizierbarkeit dargestellt und zu demonstriert werden.

1.1 Stand der Technik

Verbindungen zwischen FVK und metallischen Komponenten werden im Leichtbau bereits seit langem realisiert. Hierbei wird jedoch überwiegend auf den Einsatz von Bolzenverbindungen und/oder strukturellen Klebungen zurückgegriffen. Dies spiegelt sich beispielsweise auch in einschlägigen Fachbüchern und Richtlinien des *Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI)* wider, die als Standardwerke zur Konstruktion und Berechnung von Faserverbund- und Hybridbauteilen anerkannt sind [1A bis 3A].

Fortgeschrittene, kleb- und bolzenfreie Metall-FVK-Hybridfügungen finden vereinzelt eher im Automobil- und Flugzeugbau (z.B. formschlüssiges Fügen von metallischen und thermoplastischen Faserverbundblechen mittels Clinchen) Anwendung, in anderen Branchen sind sie jedoch bisweilen nicht standardmäßig etabliert. Im Schiffbau ist bis heute der Einsatz von verschweißten und verbolzten Stahl- und Aluminiumkonstruktionen vorherrschend. Der Großteil an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für Verbindungen maritimer Strukturen beruht auf der Weiterentwicklung von Schweißtechnologien zum metallischen Fügen (z.B. Laserschweißen und hybrides Laser-Lichtbogenschweißen) oder verbesserter Kleb- und Bolztechniken zwischen metallischen und nichtmetallischen Bauteilen [4A, 5A]. Auch in anderen Industriezweigen sind überwiegend die Weiterentwicklung von Bolzen-, Klebe- und Schweißverbindungen aktuell Gegenstand der Forschung. Dies bestätigen z.B. entsprechende Studien zu den Forschungsschwerpunkten in der Fügetechnik in den Geschäftsberichten der *Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V.* [6A, 7A].

Auch auf internationaler Ebene haben entsprechende Entwicklungen bisweilen meist einen grundlegenden Charakter ohne spezielle Anwendungsfälle. Einige Studien zu Clinch-, Ultraschall- und Reibschweißverfahren für Hybridverbunde sind exemplarisch in [10A bis 15A] geboten. Forscher der *Xi'an Jiaotong University* haben im Dezember 2018 ein Review [16A] im Wissenschaftsjournal *Rare Metal Materials and Engineering* veröffentlicht, in dem aktuelle Methoden zum Fügen von CFK-Komponenten mit Metallen zusammengefasst und bewertet

wurden. Die Studie umfasst konventionelle Methoden (Kleben, Bolzen, Schweißen) aber auch modernere Verfahren (Z-Pins, Reibschweißen). Eine umfassendes Sammelwerk auf internationaler Ebene bildet das Fachbuch *Joining of polymer-metal hybrid structures* [17A]. Aus diesem geht hervor, dass nach wie vor mechanische und klebtechnische Fügeverfahren besonders im Fokus der Forschung stehen. Auch Schweißverfahren zum Fügen thermoplastischer FVK mit Metallen (Reibschweißen, Induktionsschweißen) und reibschlüssige, bolzenfreie Verfahren (Clinchen) werden derzeit breit erforscht. Allen gemein ist, dass auf der rechnerischen Seite lediglich numerische Simulationen zur Detailanalyse des mechanischen Verhaltens der Verbindungstechniken erfolgt sind, jedoch noch keine generalisierten Entwurfs- und Berechnungsmethoden erzeugt wurden.

Bei Betrachtung des gegenwärtigen Standes der Technik wird deutlich, dass standardisierte Berechnungs- und Entwurfsmethoden lediglich für konventionelle Fügeverfahren zwischen metallischen und Faserverbundkomponenten existieren. Auch in Regelwerken der großen, internationalen maritimen Klassifikationsgesellschaften, wie z.B. *Bureau Veritas*, *DNV* oder *Lloyd's Register* finden moderne Fügeverfahren abseits der klassischen Verfahren bisweilen quasi keine Berücksichtigung.

Literaturangaben zum Stand der Technik

- [1A] VDI 2014-3:2006-09. *Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund. Berechnungen*
- [2A] VDI 2014-2:1993-09. *Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund. Konzeption und Gestaltung*
- [3A] Schürmann, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007
- [4A] *Lightweight construction for advanced shipbuilding - recent development*, Noury, P., Hayman, B., McGeorge, D. u. Weitzenböck, J., Hovik, Norwegen 2002
- [5A] Roland, F., Manzon, L., Kujala, P., Brede, M. u. Weitzenböck, J.: *Advanced Joining Techniques in European Shipbuilding*. Journal of Ship Production 20 (2004) 3, S. 200–210
- [6A] *Innovationen für die Wirtschaft - Forschung in der Fügeverfahren. Geschäftsbericht 2018*, Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, 2018
- [7A] *Innovationen für die Wirtschaft - Forschung in der Fügeverfahren. Geschäftsbericht 2017*, Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, 2017

- [10A] Lionetto, F., Mele, C., Leo, P., D'Ostuni, S., Balle, F. u. Maffezzoli, A.: Ultrasonic spot welding of carbon fiber reinforced epoxy composites to aluminum: mechanical and electrochemical characterization. *Composites Part B: Engineering* 144 (2018), S. 134–142
- [11A] Lambiase, F. u. Ko, D.-C.: Two-steps clinching of aluminum and Carbon Fiber Reinforced Polymer sheets. *Composite Structures* 164 (2017), S. 180–188
- [12A] Lambiase, F. u. Ko, D.-C.: Feasibility of mechanical clinching for joining aluminum AA6082-T6 and Carbon Fiber Reinforced Polymer sheets. *Materials & Design* 107 (2016), S. 341–352
- [13A] Huang, Y., Meng, X., Wang, Y., Xie, Y. u. Zhou, L.: Joining of aluminum alloy and polymer via friction stir lap welding. *Journal of Materials Processing Technology* 257 (2018), S. 148–154
- [14A] Feistauer, E. E., Guimarães, R.P.M., Ebel, T., dos Santos, J. F. u. Amancio-Filho, S. T.: Ultrasonic joining: A novel direct-assembly technique for metal-composite hybrid structures. *Materials Letters* 170 (2016), S. 1–4
- [15A] Abibe, A. B. u. Amancio-Filho, S. T.: Staking of Polymer-Metal Hybrid Structures. In: Santos, J. F. d. u. Amancio Filho, S. T. (Hrsg.): *Joining of polymer-metal hybrid structures. Principles and applications*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc 2018, S. 249–274
- [16A] Dawei, Z., Qi, Z., Xiaoguang, F. u. Shengdun, Z.: Review on Joining Process of Carbon Fiber-Reinforced Polymer and Metal: Methods and Joining Process. *Rare Metal Materials and Engineering* 47 (2018) 12, S. 3686–3696
- [17A] Amancio Filho, S. T. u. Santos, J. F. d. (Hrsg.): *Joining of polymer-metal hybrid structures. Principles and applications*. Hoboken NJ: John Wiley & Sons Inc 2018

1.2 Ziele des Teilvorhabens

Kernziel im Teilvorhaben der ar engineers GmbH ist die Entwicklung grundlegender aber auch anwendungsorientierter Modellierungs- und Berechnungsverfahren für klebefreie Hybridfügungen zwischen Metall- und FVK-Komponenten.

Wichtige projektspezifische Aspekte zur Erfüllung dieses Kernziels sind dabei:

- Identifikation der wesentlichen geometrischen, werkstofftechnischen und mechanischen Einflussfaktoren im Einsatz der zu entwickelnden Fügetechnologie
- Berücksichtigung der speziellen Anforderungen aus der Schiffbauindustrie
- Erstellung von belastbaren Berechnungsmodellen und -methoden zur Validierung der eingesetzten Verbindungselemente
- Optimierung der Verbindungselemente mit Fokus auf mechanisches Verhalten unter Berücksichtigung von schiffbaulichen Anforderungen

1.3 Planung und Ablauf

Der Projektplan im Teilvorhaben der ar engineers GmbH orientiert sich an der Projektplanung des Konsortiums für das Verbundprojekt und ist in die Arbeitspakete AP100, AP200 und AP500 unterteilt. Die im Verbundprojekt definierten Arbeitspakete AP300 und AP400 waren nicht Bestandteil des Arbeitsumfangs von ar engineers.

Im AP100 wurde planmäßig ein Anforderungsprofil an klebfreie, hybride Verbindungstechnologien erstellt. Zur klaren Definition der schiffbaulichen Anforderungen wurden unterschiedliche Anwendungsfälle identifiziert. Auf Basis dieses Anforderungsprofils wurden unterschiedliche Verbindungstechnologien bewertet und für die weiteren Untersuchungen und Entwicklungen in Hy-FiVE ausgewählt.

Ziel des AP200 war die Entwicklung von Berechnungs- und Designmethoden für die in AP100 ausgewählten Verbindungstechnologien mit Fokus auf die ausgewählten Fügevarianten. Zur Berechnung und zum Design wurden sowohl CAD Modelle als auch FEM Modelle und analytische Methoden herangezogen.

In den Arbeitspaketen AP300 und AP400 wurden prüftechnische sowie fertigungstechnische Untersuchungen und Entwicklungen an den in AP100 gewählten Verbindungstechnologien durchgeführt. Während die ar engineers GmbH nicht direkt in diesen Arbeitspaketen aktiv beteiligt war, so hat dennoch ein bilateraler Informations- und Erkenntnisaustausch mit den

Projektpartner zu den Ergebnissen aus AP300 und AP400 stattgefunden. Insbesondere Ergebnisse aus in AP400 durchgeführten mechanischen Versuchen waren von hoher Relevanz für die Arbeiten in AP200 und AP500.

Im AP500 wurden die Erkenntnisse aus AP200, AP300 und AP400 zusammengeführt, um Verfahren zur Produktion, Design, Berechnung und Prüfung weiter zu optimieren. Ebenfalls lag der Fokus in diesem AP auf der Skalierung der Ergebnisse und Methoden auf schiffbaulichen Maßstab.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In allen Arbeitspaketen des Teilvorhabens war eine enge Zusammenarbeit mit allen beteiligten Projektpartnern des Verbundvorhabens notwendig und konnte erfolgreich umgesetzt werden. Eine Auflistung der beteiligten Projektpartner ist nachfolgend gegeben:

- SAERTEX GmbH & Co. KG (SAERTEX)
- Hyconnect GmbH
- Fritz Moll Textilwerke GmbH & Co. KG
- EIKBOOM GmbH
- Faserinstitut Bremen e.V. (FIBRE)
- Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH (SLV Halle)

2 Arbeitspakete & Ergebnisse

Nachfolgend werden die wesentlichen Arbeitsergebnisse und wissenschaftlichen Erkenntnisse im Teilvorhaben der ar engineers GmbH dargestellt. Zur verbesserten Übersicht werden die Inhalte entsprechend der Hauptarbeitspakete AP100, AP200 und AP500 gegliedert.

2.1 AP100: Anforderung und Evaluierung Füge-technologien

In der ersten Projektphase des Teilvorhabens wurden im Rahmen der Zusammenstellung und Auswertung schiffbaulicher Anforderungen an ausgewählte Verbindungslösungen ein Entwurf eines Anforderungskatalogs erstellt, der maßgebend für die strukturmechanische Auslegung und Nachweisführung der Hybridverbindung ist. Es konnten vier schiffbauliche Anwendungsfälle identifiziert werden, die sich zur weiteren Untersuchung des praktischen Einsatzes der Hybridfüge eignen:

- Balkonstruktur einer Passagierkabine (Kreuzfahrtschiff)
- FVK-Verkleidungselemente/Decksaufbauten (Kreuzfahrtschiff, Yachtbau)
- Außenhauttür/Tenderklappe (Yachtbau)
- Radarmast (Yachtbau, Marineschiffbau)

Zu diesen Anwendungsfällen wurden gemeinsam mit dem Projektpartner Hyconnect GmbH die entsprechenden spezifischen Anforderungen an die Auslegung der Verbindungstechniken zusammengetragen. Als Grundlage wurden Anforderungen an schiffbauliche Strukturen und Komponenten aus Regelwerken und Richtlinien folgender Klassifikationsgesellschaften herangezogen:

- Bureau Veritas (BV) [1]
- Det Norske Veritas (DNV, ehem. DNVGL) [2]
- Lloyd's Register (LR) [3]
- American Bureau of Shipping (ABS) [4]

Hybride Verbindungselemente werden durch die Integration in Faserverbundbauteile und deren Einsatz an Bord von maritimen Produkten Teil dieser Anforderungsumgebung. Nachfolgend sollen diese Anforderungen benannt und, sofern bekannte oder feste Größen, Prozesse, etc. vorgegeben sind, detailliert werden.

Insgesamt wurden acht unterschiedliche Verbindungskonzepte in dieser Phase verglichen und bewertet (siehe Abbildung 1):

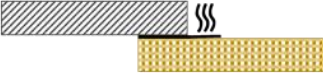

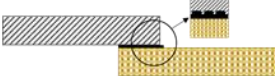


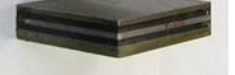
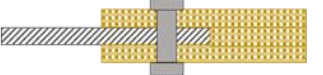

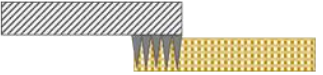

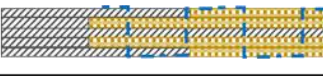





Methode	Schema	Beispiel
[1] Fügen durch den Einsatz einer thermoplastischen Matrix (ähnlich Kleben)		
[2] Oberflächenmodifikation zur verbesserten Adhäsion		
[3] Schäften und Überlappen von metallischen Anteilen und FVW-Verstärkungsfasern vor dem Laminieren zur Vergrößerung der Verbindungsflächen		
[4] Einbringen von mechanischen Barrieren auf Makroebene (Bolzen, Spotwelding, etc.)		
[5] Einbringen von mechanischen Barrieren auf Mikroebene (Haken auf Oberfläche, etc.)		
[6] Vernähen oder ähnlich von Ebenen überlappender Metall-FVW Schichten vor dem Laminieren		
[7] Verwirken, Weben, etc. von Metalldrähten oder Garnen mit FVW-Verstärkungsfasern (Hybrid Fabrics)		
[8] Einbetten der FVW-Verstärkungsfasern in Metall (Druckguss, Sintern, etc.)		

Abbildung 1: Bewertete Technologien/Verbindungskonzepte in Hy-FIVE

Kurzbeschreibung der bewerteten Technologien

- 1) Verwendung einer thermoplastischen Matrix beim Faserverbundkunststoff [FVK]. Die Metallfläche und / oder der Bereich der Kontaktfläche des FVK wird erwärmt, bis die Matrix die Fähigkeit zur Adhäsion mit der Metalloberfläche erreicht. Zur Erwärmung können induktive, laserbasierte, etc. Methoden in Frage kommen.
- 2) Die Beschaffenheit der zu fügenden Oberflächen hat einen Einfluss auf die Adhäsion der Matrix. Neben der Reinigung durch entsprechende chemische Behandlung, etc. kommt auch eine gezielte Erzeugung einer kontrollierten Oberflächenstruktur/Rauigkeit in Frage. Diese kann durch Strahlen (Sand, Glas, etc.), Schleifen bis hin zu Fräsen erreicht werden.
- 3) Einbetten und/oder Schichten von Fasergelegen/-geweben und metallischen Schichten (Folien, Bleche, Gitter, etc.). Durch die überlappende Oberfläche kann eine ausreichend große Lasttransferfläche geschaffen werden. Die metallischen Schichten werden an einem Ende mit einem monolithischen Metallblech verschweißt.

- 4) Verbolzen (ggf. mit Deck- und Bodenblech) von einem Blech mit dem Faserverbundlagen. Dies kann vor dem Applizieren der Matrix oder später mit dem FVK durchgeführt werden. In Frage kommen: Nieten, Schrauben, FSW-Spotwelding, etc.
- 5) Schaffung von mechanischen Sperrern / Haken auf der metallischen Oberfläche. Dies kann durch mechanische Bearbeitung (Durchstanzen, Schälen, etc.) oder durch Auftragsschweißen erreicht werden. Auf diese werden dann Lagen von FVK Geweben/Gelegen gedrückt und verhakt und die Matrix appliziert.
- 6) Einbetten und/oder Schichten von Fasergelegen/-geweben und metallischen Schichten (Folien, Blechen, Gittern, etc.). Die überlappenden Oberflächen werden dann mittels Tufting / Nähen miteinander verbunden. Die metallischen Schichten werden an einem Ende mit einem monolithischen Metallblech verschweißt.
- 7) Mechanische Verbindung von metallischen Fasern und Verstärkungsfasern über ein Textilverfahren (Wirken, Weben, etc.), wobei ein transients Verlauf des Anteils von Metallfasern ein Verschweißen des Textils an einer Seite ermöglicht.
- 8) Einbetten von metallischen Strukturen in eine FVK Struktur mittels „Druckguss“. Wobei a) das metallische Bauteil mit einer Matrix und Fasern umspritzt wird oder b) das FVK Bauteil von einem Metallbauteil mittels Pressen oder Druckguss umschlossen wird.

Auf Basis des entwickelten Anforderungskatalogs wurde eine Bewertungsmatrix zur systematischen Bewertung der verschiedenen Fügevarianten erarbeitet, die in der ersten Phase des Projekts untersucht wurden. Die Bewertung erfolgte dabei in folgenden Kategorien:

- Konstruktion – Alle Aspekte Auslegung und Berechnung der Verbindungselemente
- Herstellung – Alle Aspekte für die Herstellung der hybriden Verbinder (inkl. Subkomponenten und Halbzeuge)
- Belastung – Alle mechanischen Lasten (statisch und dynamisch)
- Umwelt – Alle relevanten Umgebungseinflüsse (Temperatur, Medien, Brand)
- Produktion/Integration – Alle Aspekte, um hybride Verbinder in die schiffbauliche Produktion und in die herzustellenden Faserverbundstrukturen einzubinden
- Zertifizierung – Alle Aspekte der Zulassung der Verbindungstechnik für den schiffbaulichen Einsatz

Alle Verbindungstechnologien wurden den Anforderungen gegenübergestellt und durch das Konsortium entsprechend evaluiert. Aus der entwickelten Bewertungsmatrix (siehe Tabelle 01) hat sich ergeben, dass die Verbindungstechnik Typ 7 (FAUSST-Technologie) besonders vielversprechend für die Weiterentwicklung und tiefergehende Analysen mit dem Ziel der schiffbaulichen Anwendung ist.

Tabelle 1: Bewertungsmatrix - Verbindungstechnologien

Hybride Verbindungstechnologie	Anforderungskategorien					
	Konstruktion	Herstellung	Belastung	Umwelt	Produktion	Zertifizierung
[1] Fügen durch den Einsatz einer thermoplastischen Matrix (ähnlich Kleben)	✓	✓✓✓	✓	✓	✓	✗
[2] Oberflächenmodifikation zur verbesserten Adhäsion	✓	✓✓✓	✓✓	✓	✓	✗
[3] Schäften und Überlappen von metallischen Anteilen und FVW-Verstärkungsfasern	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✗
[4] Einbringen von mechanischen Barrieren (Bolzen, Spotwelding, etc.)	✓✓	✓	✓	✓✓	✓	✓✓
[5] Einbringen von mechanischen Barrieren auf Mikroebene (Haken auf Oberfläche, etc.)	✓	✓	✓✓	✓✓	✓	✓✓
[6] Vernähen o.ä. von Ebenen überlappender Metall-FVW Schichten vor dem Laminieren	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
[7] Verwirken, Weben, etc. von Metalldrähten oder Garnen mit FVW-Verstärkungsfasern (Hybrid Fabrics)	✓✓	✓✓	✓✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
[8] Einbetten der FVW-Fasern in Metall (Druckguss, Sintern, etc.)	✗	✗	✓	✓	✗	✗

Legende:

✗ - Ausschlusskriterium ✓ - Ausreichende Eignung ✓✓ - Befriedigende Eignung ✓✓✓ - Gute Eignung

2.2 AP200: Berechnung & Design

Entsprechend der im Rahmen von AP100 zusammengetragenen Informationen wurden Konzepte zur strukturmechanischen Modellierung und Analyse der Hybridverbindungen erarbeitet. Primär wurde die FAUSST-Technologie untersucht, wobei der Fokus auf der Modellierung und Berechnung des Hybridverbinders in einsatzbereiter Konfiguration lag. Die einsatzbereite Konfiguration des FAUSST-Verbinders bedingt die Einbettung des Hybridgewirks als textile Verstärkungslage in eine duromere Matrix, wie z.B. einem Epoxidharzsystem. Diese eingebettete FAUSST-Lage ist dann Bestandteil eines durch mehrere Einzelschichten aufgebauten Faserverbundlaminats, wie es typischerweise in Deckschichten von Sandwichbauteilen oder auch monolithischen Laminaten zum Einsatz kommt. Im Kontext des Faserverbundlaminats bildet die FAUSST-Lage dann eine Übergangslage zwischen dem reinem Faserverbundkunststoff und dem metallischen Teil der Hybridverbindung, der schweißtechnisch gefügt wird (siehe Abbildung 2). Das Laminat inklusive einer oder mehrerer FAUSST-Lagen ist nach dem Aushärten des während des Fertigungsprozesses noch flüssigen Matrixsystems mechanisch belastbar. Diese mechanisch belastbare Konfiguration wird im Folgenden weiter untersucht.



Abbildung 2: FAUSST-Verbinder mit angeschweißtem Metallteil [Hyconnect GmbH]

Ziel im AP200 war vor allem die Generierung eines methodischen Prozesses zur Entwicklung makromechanischer Materialgesetze, die zur einfachen Handhabung in FEM-Simulationsumgebungen für Bauteilberechnungen implementiert werden können. Hierfür

wurde zunächst ein Multiskalen-Ansatz betrachtet, in dem der Charakterisierungsprozess der Hybridverbindung von der Mikroebene über die makroskopische Materialebene bis zur globalen Strukturebene erfolgt (siehe Abbildung 3). Die im Teilvorhaben verwendete Assoziation des Begriffs „Mikroebene“ bezieht sich dabei gezielt auf den Detaillierungsgrad eines Faser-Matrix-Verbunds, in dem die Wechselwirkungen einzelner Garne des Verstärkungstextils mit der umgebenden Matrix rechnerisch abgebildet werden können. Das Verstärkungsgarn wurde dabei vereinfacht als homogenes Volumen mit orthotropen Eigenschaften angenommen, eine detailliertere Auflösung auf Filamentbasis ist nicht erfolgt.

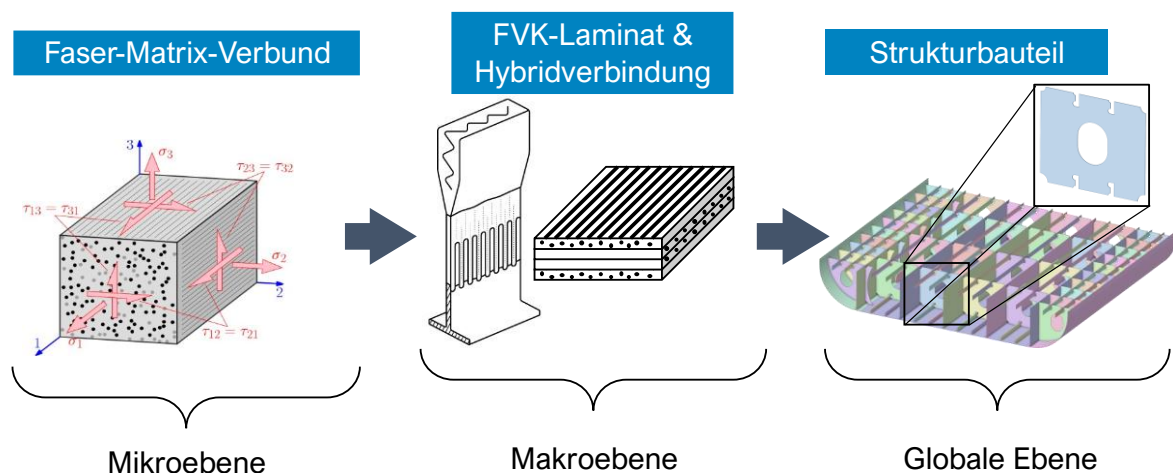


Abbildung 3: Der Multiskalen-Ansatz zur Charakterisierung der Hybridverbindung

Ziel dieses Multiskalenansatzes war die Abdeckung aller wichtigen Einflussfaktoren und Anforderungen an einen mechanischen Charakterisierungs- und Berechnungsprozesses, der bestmöglich die Erkenntnisse und Daten über den FAUSST-Verbinder aus der Mikroebene bis hin zur globalen Baugruppenebene in schiffbaulichen Dimensionen nutzbar macht.

2.2.1 Mikromechanische Analyse

Mikromechanische numerische Analysen von FVK ermöglichen es, auf Basis der hochauflösenden Modellierung der Verstärkungsfasern und der umgebenden Matrix die makromechanischen Eigenschaften des Verbunds rechnerischen vorherzusagen [Schürmann2007, Aboudi2013]. Auf Basis von sogenannten repräsentativen Volumenelementen (RVE) des untersuchten Materials wurde im Teilvorhaben die Verbundstruktur des Hybridverbinders geometrisch erfasst und über eine räumliche Diskretisierung in ein numerisch berechenbares Finite-Elemente-Modell überführt (siehe Abbildung 4). Diese Herangehensweise basiert auf dem Stand der Technik in der detaillierten

numerischen Modellierung von Textilwerkstoffen bzw. Faserverbundkunststoffen, wie beispielsweise in [Li et al. 2018] und [Cho et al. 2020] behandelt.

Das RVE bildet eine Einheitszelle der mikro-/mesoskopischen Struktur (Stahl-Glasfaser-Gewirk, eingebettet in Kunststoffmatrix) des Hybridmaterials ab, deren Materialverhalten repräsentativ für die gesamte zu betrachtende Materialzone ist und mehrfach reproduziert (mehrere RVEs aneinandergereiht) auf die makroskopische Strukturantwort des Verbindungselements schließen lässt.

Folgende Aspekte waren hierbei Inhalt näherer Untersuchung:

- Methoden zur effizienten und präzisen Ableitung eines 3D-CAD-Modells des Hybridverbinders, bestehend aus Stahlfaser-/Glasfasergewirk und umgebender Kunststoffmatrix
- Definition des RVEs und seiner geometrischen Merkmale
- Definition von Grundlastfällen zur Bestimmung der mikromechanischen Materialantwort und Gewinnung charakteristischer Elastizitätskennwerte für das RVE
- Konzepte zur Erzeugung von strukturmechanisch sinnvollen Festigkeitsvorhersagen für das RVE im Abgleich mit experimentell ermittelten makroskopischen Festigkeiten des FAUSST-Verbinders
- Konzepte zur Evaluation der Diskretisierung des RVE mittels 3D-Tetraeder- und Hexaederelementen mit linearen und quadratischen Verschiebungsansätzen über Netzstudien

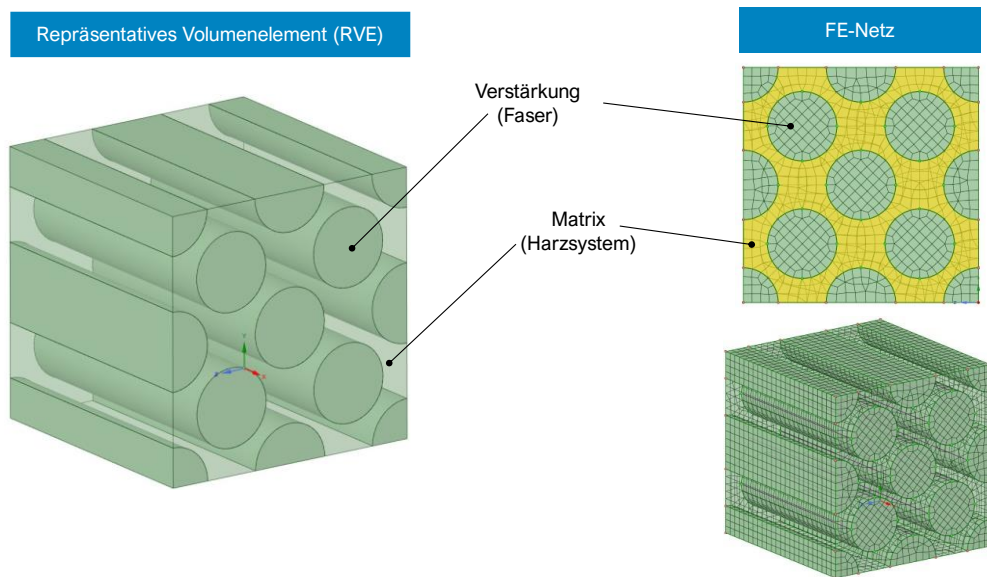


Abbildung 4: Ein repräsentatives Volumenelement (RVE) eines unidirektional faserverstärkten Kunststoffes

Aufbauend auf diesen Konzepten zur Modellierung der Hybridverbindung wurden Methoden zur geometrischen Abbildung der textilen Struktur der FAUSST-Technologie erarbeitet. Zwischen den verschiedenen bestehenden Varianten von FAUSST wurde zunächst eine Variante für die Untersuchung ausgewählt (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Verschiedene Varianten des FAUSST-Textils [Fritz Moll Textilwerke GmbH & Co. KG]

Zur Entwicklung von strukturmechanischen Materialgesetzen, die für die numerische Simulation der Verbindung auf der makroskopischen Strukturebene genutzt werden können,

ist zunächst die präzise geometrische Abbildung der werkstofflichen Bestandteile der FAUSST-Verbindung (Glasfasergewirk, Stahlfasergewirk, Kunststoffmatrix) notwendig. Aufgrund der komplexen, dreidimensionalen Struktur des Gewirks wurde daher eine Umfassende geometrische Charakterisierung der textilen Halbzeuge über hochauflösende Fotografien und Fertigungsunterlagen vorgenommen, weiterführende Methoden zur geometrischen Erfassung, wie z.B. 3D-Scans, waren nicht verfügbar.

Auf Basis der so gewonnenen Informationen wurden parametrische CAD-Geometrien mithilfe des kommerziellen Modellierungswerkzeugs *SolidWorks* sowie dem Open-Source-Tool *TexGen* erzeugt (siehe Abbildung 6). Zur Überführung der CAD-Geometrie in rechenfähige numerische Modelle wurden verschiedene Varianten an Finite-Elemente-Netzen hinsichtlich Auflösung und Elementtyp (Voxel-, Tetra- und Hexaederelemente) generiert.

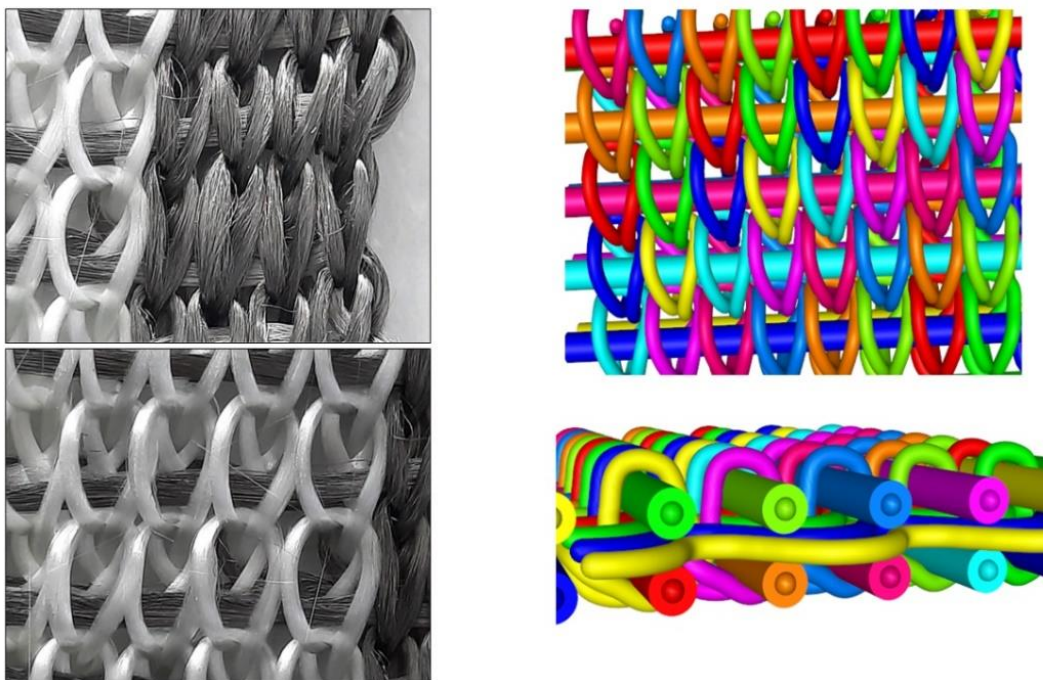


Abbildung 6: Detailaufnahme des FAUSST-Textils (links) und in TexGen modellierte Gewirkstruktur (rechts)

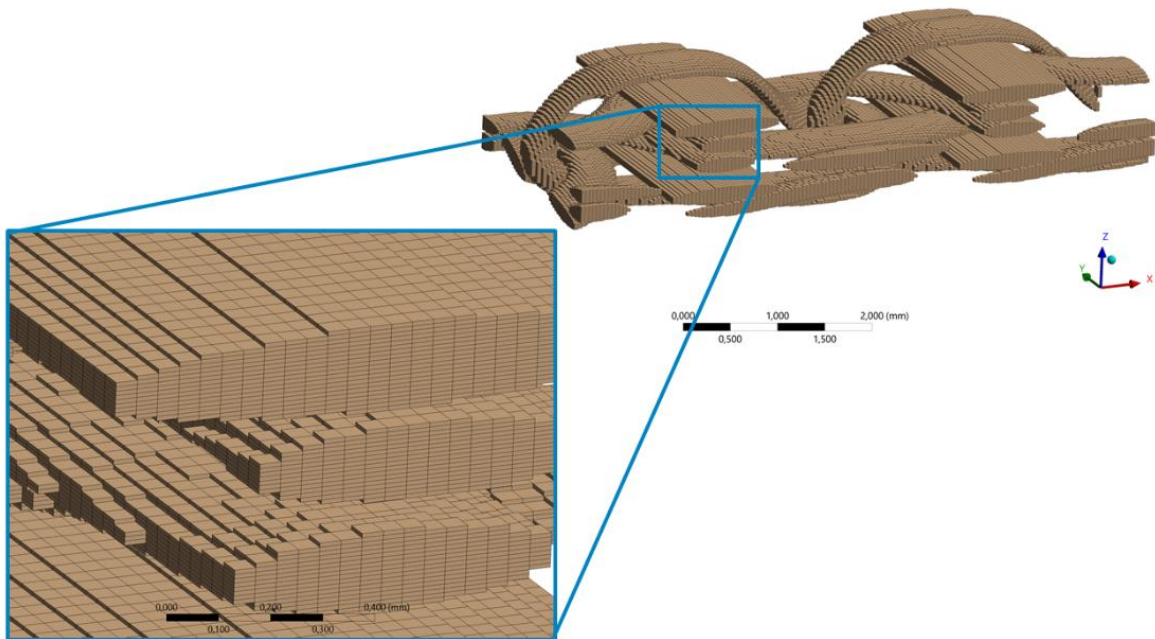


Abbildung 7: Voxelnetz der FAUSST-Gewirkstruktur (Bereich des reinen Glasfasergewirks)

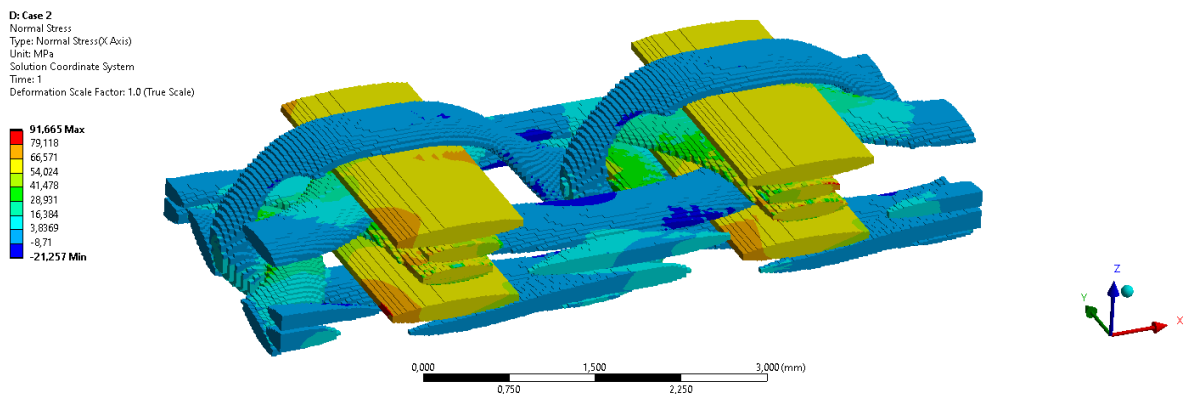


Abbildung 8: Spannungsverteilung in der FAUSST-Gewirkstruktur

Nach zahlreichen Versuchen der automatisierten Geometrieerzeugung und Vernetzung von RVEs in TexGen konnte jedoch kein zufriedenstellendes Ergebnis hinsichtlich der Netzqualität erzeugt werden. Aufgrund der inhärenten Eigenschaft von Voxelnetzen, dass kontinuierliche Topologien stets über würfel- oder quaderförmige finite Elemente abgebildet werden, entstehen geometrische Sprünge in Form von Stufenmustern in gekrümmten Flächen und entlang gekrümmter Kanten (siehe Abbildung 7). Der Einfluss dieser Stufenmuster auf das numerische Lösungsverhalten entsprechender FE-Modelle sowie die Aussagekraft der so berechneten Ergebnisgrößen wurde intensiv untersucht. Mit den im Projekt verfügbaren Ressourcen konnten die Einflüsse dieser Störungen insbesondere auf

Spannungsgrößen nicht in ausreichendem Maße minimiert bzw. beherrschbar gemacht werden, weshalb dieser Modellierungsansatz für Festigkeitsprognosen der RVE nicht weiter verfolgt wurde.

Aus diesem Grund wurde eine alternativer Modellierungsprozess mittels SolidWorks und dem Präprozessor der kommerziellen FEM-Software Ansys Mechanical erarbeitet (siehe Abbildung 9). Dies erlaubt ebenfalls eine parametrische Geometrieerzeugung, jedoch mit deutlich geringerem Automatisierungsgrad und somit gesteigertem manuellen Modellierungsaufwand.

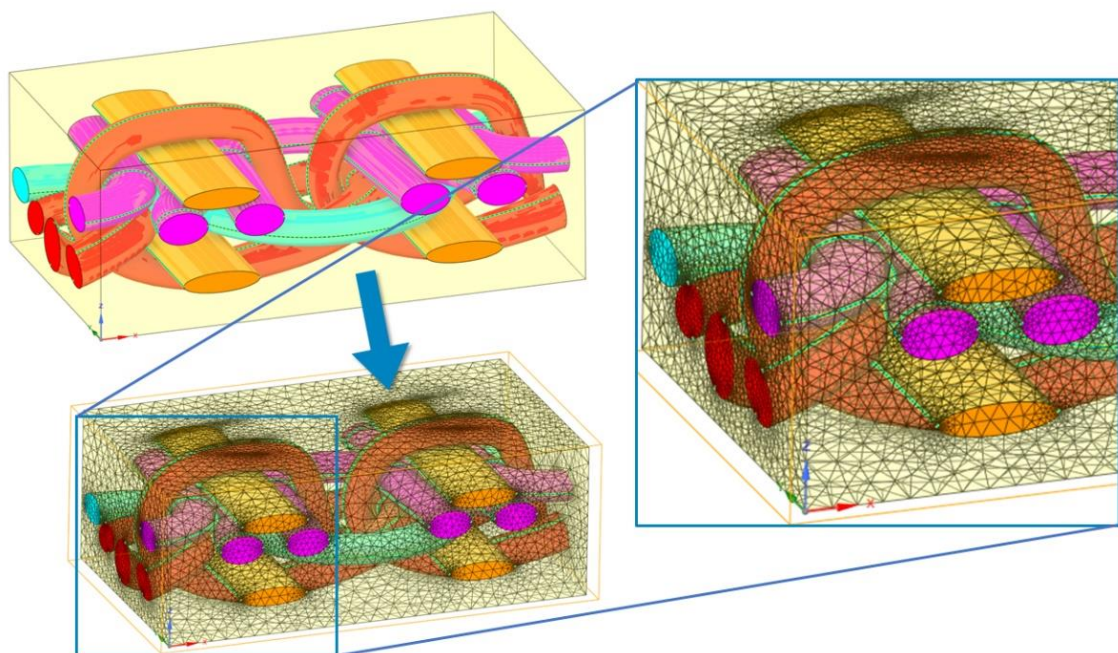


Abbildung 9: Abbildung eines RVEs als CAD-Geometrie (oben) und FE-Netz (unten)

Anhand der so neu erzeugten RVEs (vgl. Abbildung 9) konnten neue FE-Modelle generiert werden, die die Topologie des RVE ausreichend präzise abbilden. Daraufhin wurden verschiedene numerische Berechnungen durchgeführt, um das orthotrope Materialverhalten des RVE rechnerisch zu bestimmen. Dabei wurden folgende physikalische Eigenschaften berechnet:

- Elastizitätsmoduln in Kett-, Schuss- und Dickenrichtung
- Schubmoduln in allen drei Orthotropieebenen
- Querkontraktionszahlen in allen drei Orthotropieebenen

Die Bestimmung dieser physikalischen Konstanten ist ein elementarer Bestandteil der makroskopischen Charakterisierung der FAUSST-Verbindung, da diese Kennwerte standardmäßig für Finite-Elemente-Berechnungen von Bauteilen mit orthotropen Werkstoffen verwendet werden müssen.

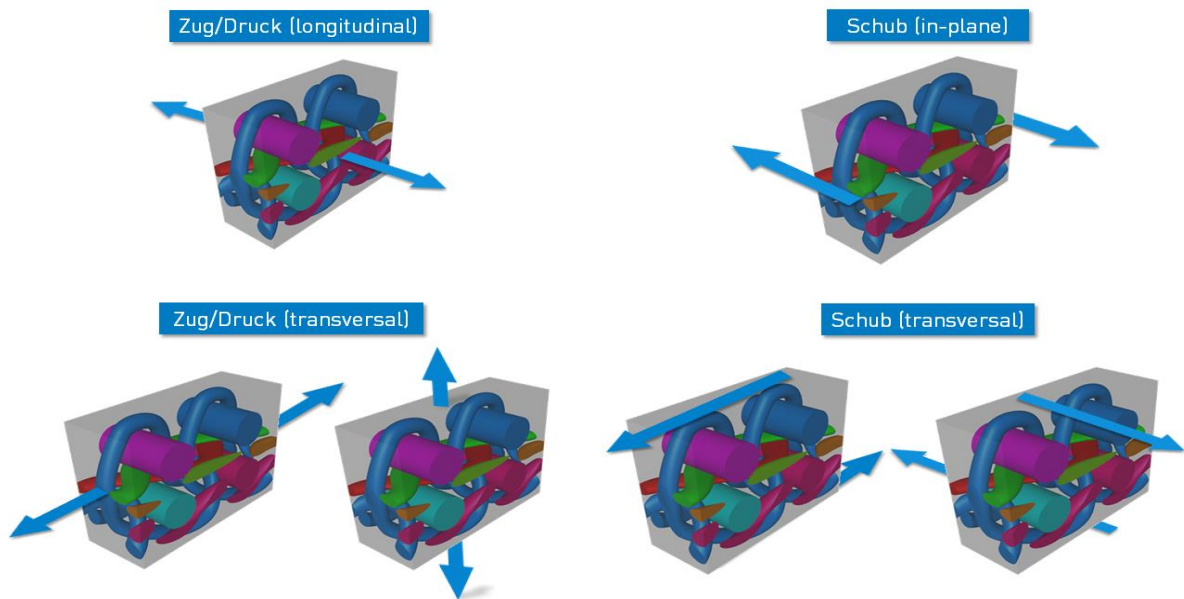


Abbildung 10: Einheitslastfälle zur Bestimmung der Grundelastizitätsgrößen am RVE

Über die Aufbringung von Einheitskräften (siehe Abbildung 10) bzw. Einheitsverschiebungen und die daraus resultierenden Antworten (Verzerrungen bzw. Reaktionskräfte innerhalb des RVE) lassen sich rechnerisch die makroskopischen Grundelastizitätskennwerte bestimmen. Da dies numerisch erfolgt, ist auf eine ausreichende Qualität und Feinheit der finiten Elemente zu achten, weshalb ebenfalls umfangreiche Netzstudien durchgeführt wurden.

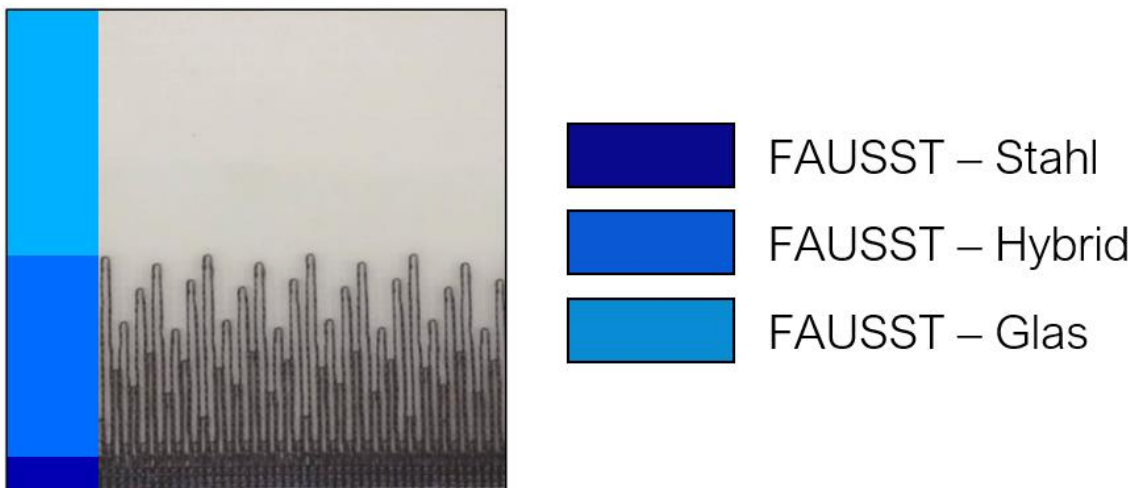


Abbildung 11: Unterteilung der berechneten Materialzonen im FAUSST-Verbinder

Zur vollständigen Charakterisierung des Hybridverbunds sind entsprechende Simulationen an RVEs für jede charakteristische Materialzone des Verbinders durchzuführen (siehe Abbildung 11):

- Zone 1 (FAUSST – Glas): Bereich des reinen Glasfasergewirks
- Zone 2 (FAUSST – Hybrid): Übergangsbereich zwischen Glas- und Stahlfasergewirk
- Zone 3 (FAUSST – Stahl): Bereich des reinen Stahlfasergewirks

Zur Validierung der durch die numerischen Modelle prognostizierten Elastizitätskennwerte wurden diese mit entsprechenden Daten aus praktischen Versuchen verglichen. Nach Validierung des Modellierungsprozesses anhand der Materialzone 1 wurden weitere parametrische RVEs der Materialzonen 2 und 3 aufgebaut und simuliert. Die Simulationen brachten gute Übereinstimmungen in den berechneten Elastizitätskennwerten im Vergleich zu experimentell ermittelten Steifigkeiten des FAUSST-Verbinders für die unterschiedlichen Materialzonen.

2.2.1.1 Versagenssimulation zur Festigkeitsprognose

Zur statischen Festigkeitsvorhersage und physikalisch basierter Beschreibung des Schädigungs- und Versagensverhaltens des FAUSST-Verbinders wurden nichtlineare, progressive Schädigungssimulationen an RVEs durchgeführt.

Der Ansatz einer progressiven Schädigungssimulation am RVE verfolgt das Ziel, dass mit jedem Lastinkrement die Beanspruchungen in jedem finiten Element des RVE den definierten maximalen Beanspruchbarkeiten gegenübergestellt werden. Wird ein Beanspruchbarkeitskriterium verletzt, also die rechnerische Festigkeit überschritten, so wird das betroffene Element entweder gelöscht oder in seinen mechanischen Eigenschaften degradiert, sodass es nur noch reduziert oder nahezu gar nicht weitere Lasten aufnehmen kann. Auf diese Weise lässt sich ein Schädigungswachstum im RVE iterativ berechnen, bis der Großteil der finiten Elemente „versagen“, also nicht weiter an der Kraftübertragung beteiligt sind. Die dann am RVE herrschende äußere Last oder Verschiebung zu diesem Zeitpunkt kann rechnerisch als Festigkeitsgrenze des RVE und damit des Verbundmaterials definiert werden [Singh2016].

Im Teilvorhaben wurde differenzierende Schädigungsgesetze (Versagenskriterien) für die einzelnen Komponenten des FAUSST-Verbunds (Glasfasergewirk und umgebende Matrix) definiert, die im iterativen Lösungsprozess Einfluss auf das mechanische Verhalten der finiten Elemente im RVE haben und somit ein kontinuierliches Wachstum von sich einstellenden Schädigungen im Material numerisch abbildbar machen, ohne dass solche Schädigungen geometrisch erfasst oder implementiert werden müssen.

Die progressive Schädigungssimulation wurde so konfiguriert, dass in jeder Iteration die spezifischen Versagenskriterien je Element mit dem aktuell herrschenden räumlichen Spannungszustand verglichen werden. Wird das Kriterium der Faser- bzw. Matrixfestigkeit verletzt, so wird die Steifigkeit des betroffenen Elements so stark reduziert, dass es in der nächsten Iteration nicht weiter an der Lastübertragung beteiligt ist. Durch die dann entstehende Umverteilung der Beanspruchungen entsteht ein neuer Spannungszustand in den umliegenden Elementen, der erneut ausgewertet wird. Mit dieser differenzierenden Vorgehensweise kann eine schrittweise Schädigungsausbreitung im Material unter Berücksichtigung der orthotropen Werkstoffeigenschaften simuliert werden.

Zur Steuerung der Simulation werden für jede Materialphase Schadenseintrittskriterien sowie Steifigkeitsreduktionsfaktoren definiert:

- Versagenskriterien für Zug & Druck der Fasern (Maximalspannung)
- Versagenskriterien für Zug & Druck der Matrix (Maximalspannung)
- Schadensfortschrittsgesetz (Steifigkeitsdegradation)
- Reduktionsfaktor Fasersteifigkeit (Zug & Druck)
- Reduktionsfaktor Matrixsteifigkeit (Zug & Druck)

Zur Kalibrierung dieser Parameter im allgemeinen Faser-Matrix-Verbund wurden zunächst Validierungssimulationen anhand eines unidirektionalen (UD) Faser-Matrix-RVE durchgeführt und die rechnerisch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven mit simulativen und experimentellen Referenzkurven aus der Literatur verglichen [Milne et al. 2003, Kaminski 2005, Wan et al. 2023]. Nach Durchführung mehrerer Simulationsversuche konnten geeignete Parametersätze zur hinreichend genauen Prognose der Zugfestigkeit und Bruchdehnung des UD-RVEs bestimmt werden. Die Verläufe der Spannungs-Dehnungs-Kurven im Post-Versagensbereich konnten aufgrund starker numerischer Unregelmäßigkeiten jedoch nicht validiert werden.

Zur Entwicklung alternativer Möglichkeiten zur rechnerischen Festigkeitsprognose wurden Ansätze mithilfe von Simulationen auf der Makroebene verfolgt. Auf dieser Detaillierungsebene wurden der Faser-Matrix-Verbund als homogenisiertes Volumen mit makroskopischen, orthotropen Materialeigenschaften numerisch abgebildet. Die Elastizitätskennwerte, die für die Berechnung der sich einstellenden räumlichen Spannungszustände im FAUST-Verbinder notwendig sind, konnten aus den vorgeschalteten Simulationen an den FAUSST-RVEs genutzt werden. Es wurden zunächst makroskopische Simulationen an Probekörpergeometrien eines biaxialen GFK-Laminats, aufgebaut aus in 0°-

und 90°-Richtung orientierten UD-Schichten, durchgeführt. Sogenannte Biax-Laminatschichten mit 0°/90°-Orientierung oder auch +45°/-45°-Orientierung kommen standardmäßig in der Konstruktion von lasttragenden Faserverbundbauteilen zum Einsatz, entsprechende textile Halbzeuge, z.B. vorgefertigte Glasfasergewebe oder -gelege, sind vielfältig am Markt verfügbar. Es wurden spezifische Versagenskriterien nach Hashin [Hashin 1980] zur Definition einer Schadensinitiierung in der homogenisierten Laminatschicht festgelegt. Die Ergebnisse mehrerer Simulationsversuche wurden ebenfalls mit theoretischen und experimentellen Referenzdaten aus der Literatur verglichen [Barbero 2017, Lapczyk 2007]. Auch hier konnte eine gute Annäherung an die experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven sowie Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen in den Hauptrichtungen der Laminatschichten hervorgebracht werden.

Auf Basis dieser Erkenntnisse aus den Simulationen an UD-RVEs sowie Biax-Laminaten wurden erneut entsprechende Simulationsversuche für ein- und mehrachsige Beanspruchungen des FAUSST-RVE vorgenommen. Hier konnten jedoch keine stabilen numerischen Lösungsprozesse gefunden werden, da aufgrund des komplexen Versagensverhaltens abrupte Änderungen der mechanischen Eigenschaften des Berechnungsmodells die Konvergenz der Simulationen erheblich erschwerten. Trotz weiterer Ertüchtigungsarbeiten an der Modellqualität und Verbesserungen am Konvergenzverhalten, konnte der Rechenaufwand nicht signifikant reduziert werden (ca. 20-36 Stunden je Durchlauf), was zu erheblichen Einschränkungen der verfügbaren Ressourcen geführt hat. Aufgrund dessen wurde abschließend der Fokus auf die Makromechanik gesetzt.

2.2.2 Makromechanik

Um das makroskopische Materialverhalten eines FAUSST-Laminats numerisch zu modellieren, wurden die Materialzonen 1 und 2 (siehe Abbildung 11) ausgewählt. Gemeinsam mit dem Faserinstitut Bremen (FIBRE) wurden quasistatische, einachsige Belastungen definiert, woraufhin Zug- und Druckprobekörper vom FIBRE hergestellt und geprüft wurden (siehe Abbildung 12). Die Ergebnisse dieser Versuche zeigen ein nichtlineares Verhalten für beide bewerteten Bereiche. Dieses Verhalten kann näherungsweise über ein sogenanntes bilineares Materialgesetz rechnerisch modelliert werden. Dafür wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt: ein Schädigungsmodell sowie ein bilinear-isotropes Verfestigungsgesetz mit Fließkriterium.

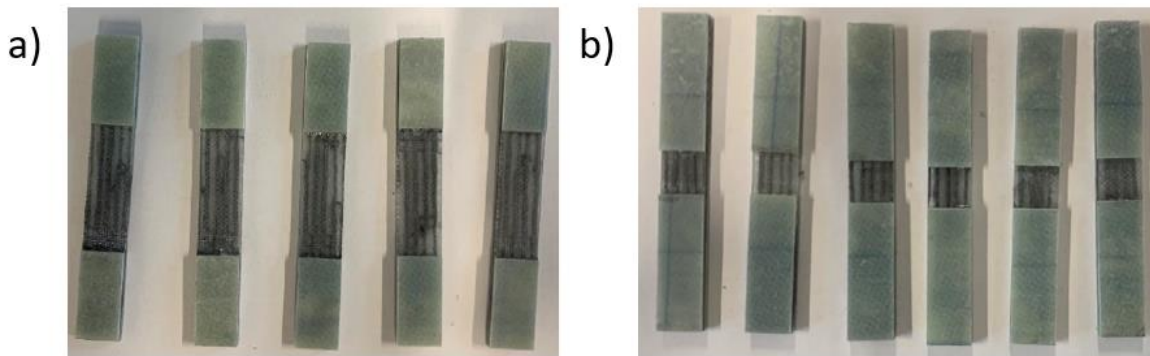


Abbildung 12: Probekörper für a) Zugversuche und b) Druckversuche

Der erste Ansatz, der gewählt wurde, war ein Schädigungsmodell unter beanspruchungsabhängiger Abminderung der Materialeigenschaften. Dieses Modell eignet sich gut für orthotrope Werkstoffe. Zuerst werden für jede Hauptrichtung des Werkstoffs einzelne Grenzspannungen definiert. Daraufhin werden Steifigkeitsreduktionsfaktoren für Zug- und Druckbeanspruchungen je Hauptrichtung festgelegt, die sukzessive greifen, sobald die Grenzspannung rechnerisch überschritten wird. Die lokale Schädigung im Material wird modellseitig über eine iterative Reduktion der Steifigkeit im Material abgebildet, sodass sich eine Spannungsumlagerung hin zu den noch intakten Bereichen des Materials einstellt.

Im Rahmen des ersten Ansatzes wurden zwei verschiedene Arten der Modellierung erprobt. Eine, bei der verschiedene Steifigkeiten hinzugefügt wurden, um Materialunsicherheiten zu simulieren (Modellierung 1 in Abbildung 13), und eine weitere, nur mit der Standardmaterialsteifigkeit von FAUSST (Modellierung 2 in Abbildung 13). Um das Gleichgewicht der Kräfte und Momente aufrechtzuerhalten, weisen die resultierenden Spannungs-Dehnungs-Kurven der beiden Modellierungen eine Übergangsphase auf, die das im Versuch beobachtete Verhalten der FAUSST-Proben nicht exakt beschreibt. In Modellierung 1 wird die Spannung bei einem geringen Anstieg der Dehnung reduziert. Bei Modellierung 2 nimmt die Dehnung bei einer konstanten Spannung, die auf das Modell wirkt, zu. Obwohl die Modellierungstechnik grundsätzlich zur Abbildung der Degradation der Materialeigenschaften geeignet ist, um Schäden in Verbundwerkstoffen zu beschreiben, kann das Modell das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des FAUSST-Verbinders derzeit noch nicht exakt beschreiben.

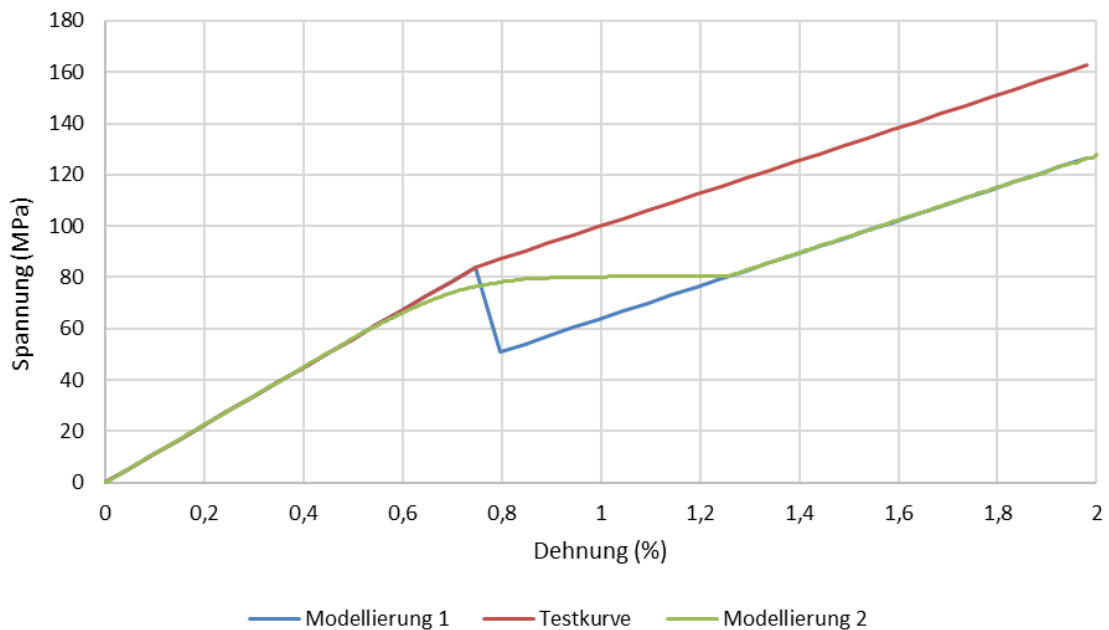


Abbildung 13: Spannungs-Dehnungsdiagramm mit Schädigungsmodell

Der zweite Ansatz ist die Simulation mittels bilinear-isotroper Verfestigung, die im Allgemeinen zur Beschreibung des plastischen Verhaltens metallischer Werkstoffe verwendet wird, sich allerdings grundsätzlich auch gut zur näherungsweisen Simulation von nichtmetallischen Werkstoffen mit nichtlinearem Spannungs-Dehnungs-Verhalten nutzen lässt. Bei diesem Ansatz wird neben der Definition eines E-Moduls im linear-elastischen Bereich der Spannungs-Dehnungskurve zusätzlich ein zweiter, linearer Bereich definiert, der sich durch Vorgabe eines Schwellwerts, z.B. einer Streck- bzw. Fließgrenze, sowie eines Tangentenmoduls steuern lässt. Der Tangentenmodul beschreibt die Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve im zweiten Abschnitt des bilinearen Werkstoffmodells.

Mithilfe des Hill-Fließkriteriums [Hill 1983] kann die bilinear-isotrope Verfestigung um richtungsabhängige Streckgrenzen erweitert werden. Dies ist wichtig, um der Orthotropie des FAUSST-Materials auch in der Bewertung der Festigkeiten gerecht zu werden. Eine besondere Herausforderung stellte die Erzeugung von Materialdaten dar, die das Materialverhalten entlang der zwei Hauptrichtungen in der Schichtebene gut abbilden. Die Grenzspannungen und der benötigte Tangentenmodul unterscheiden sich je nach Richtung deutlich voneinander. Damit die beiden Spannungs-Dehnungs-Kurven für die 0°- und 90°-Richtung (Kett- und Schussrichtung von FAUSST) im Glasbereich mit den Kurven aus der Simulation größtenteils übereinstimmen (siehe Abbildung 14), wurde in 0°-Richtung die Streckgrenze gegenüber den Testdaten leicht erhöht und in 90°-Richtung leicht gesenkt. Ein

Tangentenmodul von 4000MPa wurde für beide Richtungen definiert, ebenfalls wurden beide Elastizitätsmoduln gegenüber den Messwerten leicht erhöht.

Der Hybridbereich (Glas- & Metallfasern) zeigt nur in 90°-Richtung ein nichtlineares Verhalten (siehe Abbildung 15). Zur Modellierung wurde wieder die bilinear-isotrope Verfestigung mit dem Hill-Fließkriterium genutzt. Die 0°-Richtung reicht ein Elastizitätsmodul um das Verhalten ausreichend genau zu beschreiben. In der bilinearen-isotrope Verfestigungsgesetz wird daher die Streckgrenze von der 90°-Richtung übernommen. Die Faktoren im Hill-Fließkriterium für die 90°- und 0°-Richtung wurden so angepasst, dass für die 0°-Richtung kein Tangentenmodul verwendet wird. Der Hybridbereich in 90°-Richtung hat einen Tangentenmodul von 3500 MPa.

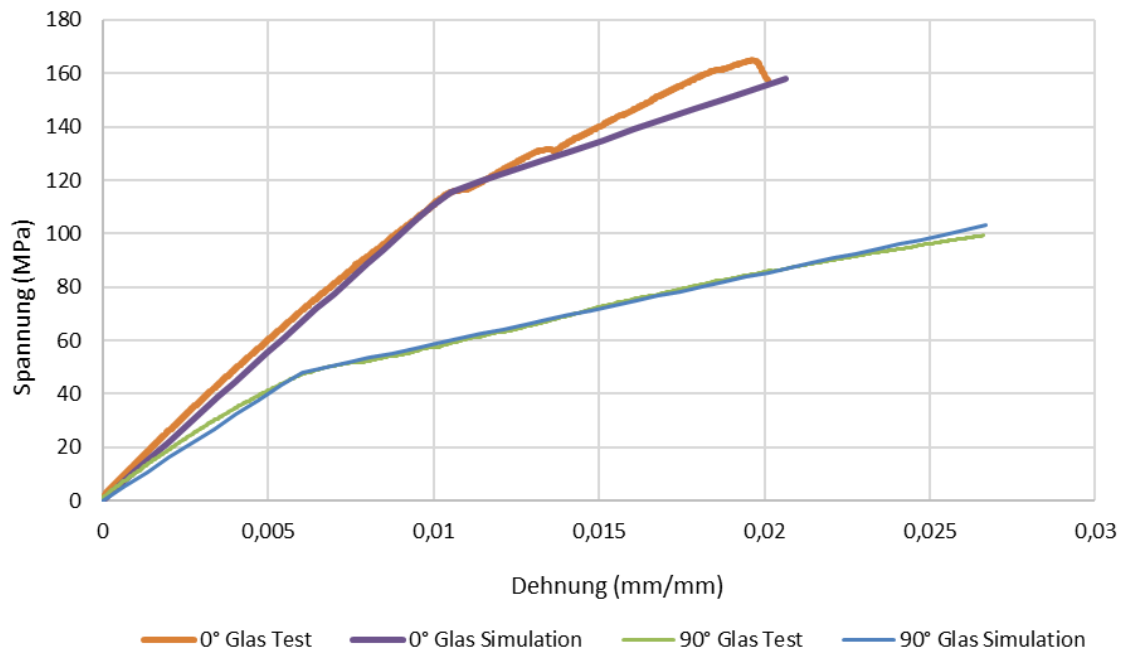


Abbildung 14: Spannungs-Dehnungsdiagramm des Glasbereichs

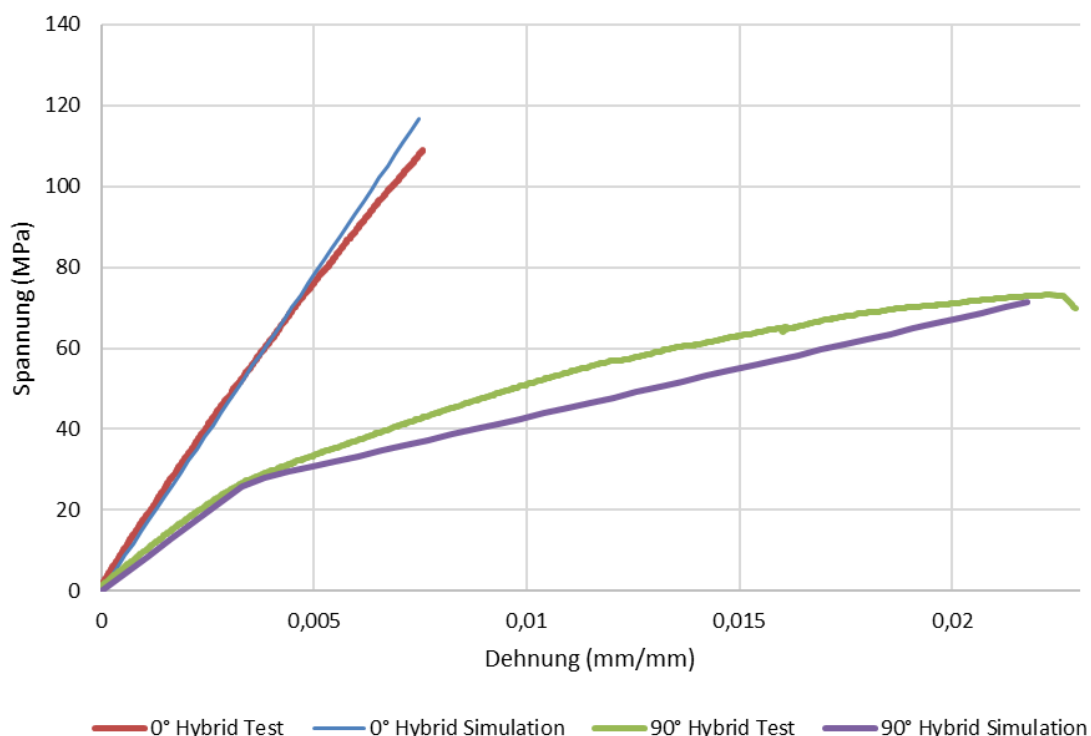


Abbildung 15: Spannungs-Dehnungsdiagramm des Hybridbereichs

Schließlich hat sich das zweite Modell, das bilinear-isotrope Verfestigungsgesetz mit Fließkriterium, bei der Beschreibung des gemessenen nichtlinearen Verhaltens von Zone 1 und Zone 2 des FAUSST-Materials als hinreichend präzise erwiesen.

2.2.3 Schweißsimulationen

Parallel zu den numerischen Analysen der FAUSST-Verbindung wurden im AP200 ebenfalls umfangreiche thermomechanische Simulationen durchgeführt, mit dem Ziel, den Einfluss des Wärmeeintrags in der metallischen Zone von FAUSST während des Schweißprozesses zu untersuchen und Erkenntnisse aus praktischen Schweißversuchen zu validieren. Diese Arbeiten sind in Kooperation mit dem Projektpartner SLV Halle erfolgt.

Ursprung der Untersuchungen war die Fragestellung der Wärmebeständigkeit der Haftung zwischen Glasfaser und Matrix im FAUSST-Verbinder. Die Glasfaser, die im FAUSST-Material verwendet wird, ist mit einer Beschichtung, der sogenannten „Schlichte“ versehen, um die Haftung zwischen Faser und Matrix und damit die Verbundfestigkeit zu erhöhen, was eine Steigerung der mechanischen Belastbarkeit zur Folge hat. Diese Beschichtung darf einer Temperatur von maximal 200°C ausgesetzt sein, bevor ihre Zersetzung beginnt und die Aufgabe der Haftvermittlung nicht weiter ausreichend erfüllt werden kann.

Um das Einhalten dieser Temperaturgrenze während des Schweißprozesses zu gewährleisten und den Wärmeleitungsvorgang von der Schweißzone in den Glasfaserbereich zu verstehen, wurde vom Kooperationspartner SLV Halle 2D-Simulationen in der Schweißsimulationssoftware SORPAS durchgeführt. Dazu wurden die Geometrie und die Parameter des Schweißprozesses, die zum Fügen von FAUSST angewendet werden, als Grundlage der numerischen Simulation verwendet. Nach Angaben der SLV Halle ist die Software SORPAS jedoch in ihren Anpassungsmöglichkeiten hinsichtlich Geometrie, Vernetzung und Simulationsparametern stark eingeschränkt, was eine zielführende Anwendbarkeit für die Untersuchung der FAUSST-Technologie erschwert. Aus diesem Grund wurde beschlossen, diese thermischen Analysen mithilfe der bei der ar engineers GmbH verfügbaren Simulationswerkzeuge weiterzuführen.

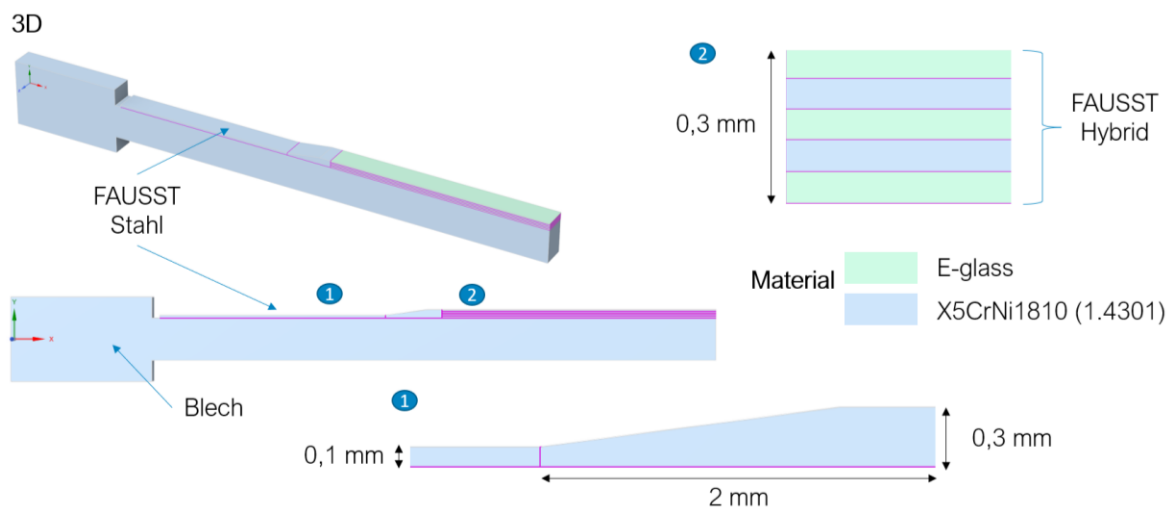


Abbildung 16: 3D-Modell für thermische Simulationen am FAUSST-Verbinder

FE-Modell – Ergebnisse

- Temperaturverteilung für $t = 290$ ms (Ende von Puls 3)
- Maximale Temperatur: 303°C
- Glasfaser T max: 117°C

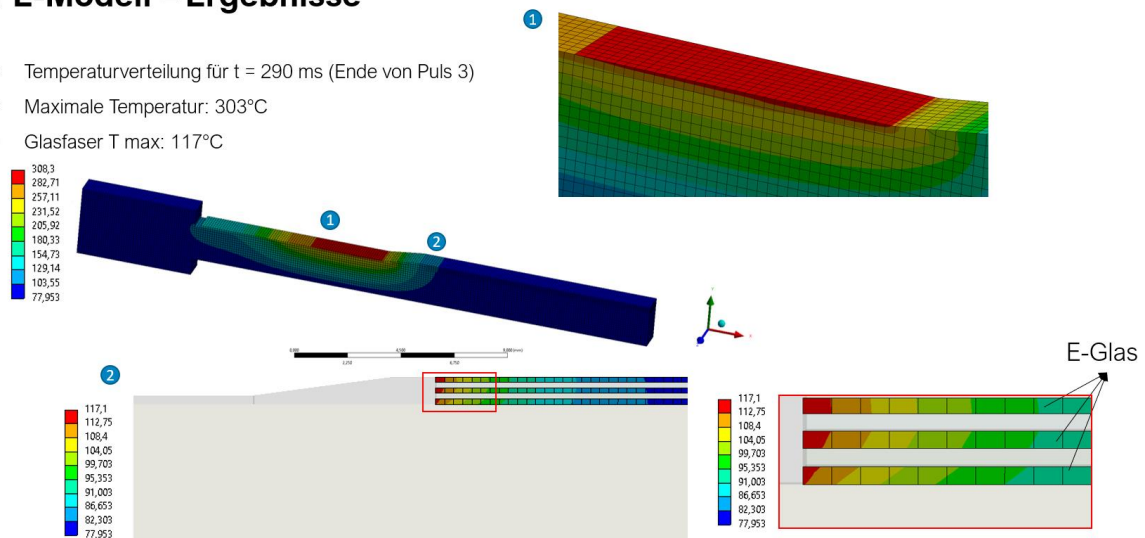


Abbildung 17: 3D-Simulationsergebnisse der Wärmeleitung im FAUSST-Verbinder

Zur Bewertung des Wärmeleitprozesses durch die verschiedenen Materialzonen wurden 2D- und 3D-Simulationen in Ansys Mechanical durchgeführt (siehe Abbildung 16 und Abbildung 17). Die Schweißparameter wurden direkt auf die thermische Leistungsdichte des Wärmeeintragsprozesses umgerechnet, unter der Annahme, dass die gesamte Energie in Wärme umgewandelt wird. Darüber hinaus wurde die Berücksichtigung der Umgebung, in der der Schweißprozess stattfindet, zur Formulierung der Problemstellung verwendet. Zur Validierung des 3D-Modells mit dem Schweißprozess wurde die Temperaturverteilung entlang der Fügezone ausgewertet. Die Ergebnisse der Simulation zeigten eine maximale Erwärmung des GFK-Bereichs auf ca. 117°C und damit eine gute Übereinstimmung mit den zuvor in SORPAS erzeugten Daten. Die Berechnungsergebnisse bestätigten die aus der Praxis hervorgehenden Erkenntnisse, dass die Glasfasern im FAUSST-Verbinder keinen exzessiven Temperaturanstieg während des Schweißprozesses erfahren und somit keine Schädigung der Schlichte während des Schweißens zu erwarten ist.

2.3 AP 500: Optimierung Berechnung & Design

Ziel im AP500 war für ar engineers die Optimierung der im AP200 entwickelten Modelle und Berechnungsmethoden. Sämtliche in den APs 200 bis 400 gewonnenen Erkenntnisse aus den Bereichen Design & Modellierung, Berechnung, Produktion, Integration und Prüfung werden gebündelt und als Basis für die Optimierung genutzt. Weiterführend wurden die Modelle und Methoden für die Anwendung im großen, schiffbaulichen Maßstab weiterentwickelt. Hierbei galt es insbesondere, die Modellkomplexität und den Rechenaufwand bzw. die anfallenden Datenmengen in der Ergebnisauswertung

beherrschbar zu machen und eine gute Lösung zwischen den meist in Konflikt stehenden Gesichtspunkten Effizienz und Ergebnisgenauigkeit zu finden.

2.3.1 Demonstratorentwurf

Zur Vorbereitung des Demonstrators für den ersten Brandversuch wurde in Kooperation mit den Projektpartnern Saertex und Hyconnect der Entwurf eines Hybridcontainers durchgeführt. Der Hybridcontainer besteht aus einem Rahmen aus miteinander verschweißten Stahlprofilen sowie GFK-Sandwichplatten, die mithilfe der FAUSST-Technologie schweißtechnisch mit den Stahlprofilen verbunden werden. Der Stahlrahmen inkl. der verbauten GFK-Sandwichplatten und der strukturellen Verbindungen zwischen Sandwichplatten und Stahlrahmen wurde konstruiert, die Anbindungen mittels FAUSST-Verbinder wurden über Handrechnungen vordimensioniert sowie anschließende FEM-Simulationen im Detail ausgelegt. Der Laminataufbau der GFK-Sandwichplatten wurde vom Projektpartner Saertex definiert.

Im Rahmen einer Entwurfsstudie der FAUSST-Verbinder im Container wurde ein mechanischer Referenzlastfall eingeführt, in dem eine homogene Drucklast von 3kN/m^2 auf eines der GFK-Sandwichplatten aufgebracht wird. Auf Basis dieses Referenzlastfalls wurde eine strukturmechanische FEM-Analyse der Verbindungsstellen durchgeführt. Die FAUSST-Verbindung wurde dabei zunächst makroskopisch vereinfacht mit homogenisierten, orthotropen Materialkennwerten modelliert. Ziel der Entwurfsstudie war die Untersuchung der Schnittkraft- und -momentenverteilung entlang der Verbindungslinien zwischen Sandwichplatte/FAUSST-Verbinder und Stahlrahmen, um daraus Entwurfsschnittgrößen in Form von breitenspezifischen Kraft- und Momentenflüssen für die weitere Dimensionierung des FAUSST-Verbinders in anderen Strukturen zu gewinnen.

2.3.2 Konzipierung des globalen Modellierungsprozesses

Zur weiteren Entwicklung des globalen, FEM-gestützten Entwurfsprozesses von schiffbaulichen Strukturanbindungen zwischen GFK- und Stahlkomponenten mittels FAUSST wurden Konzepte zur Definition der Arbeitsabfolge in der Modellierung erarbeitet. Ziel war dabei die Etablierung eines möglichst standardisierten Verfahrens zur vollständigen Modellierung, Simulation und Ergebnisauswertung der mit FAUSST gefügten Struktur mithilfe von industriell standardmäßig eingesetzten, kommerziellen Simulationswerkzeugen. Eine besondere Anforderung an den Berechnungsprozess war dabei die möglichst wirtschaftliche, also effiziente Vorgehensweise unter Notwendigkeit möglichst weniger Eingangsparameter.

Im Teilvorhaben wurde dafür die Simulationsumgebung Ansys Mechanical in den Versionen 2020R1 bis 2023R2 verwendet.

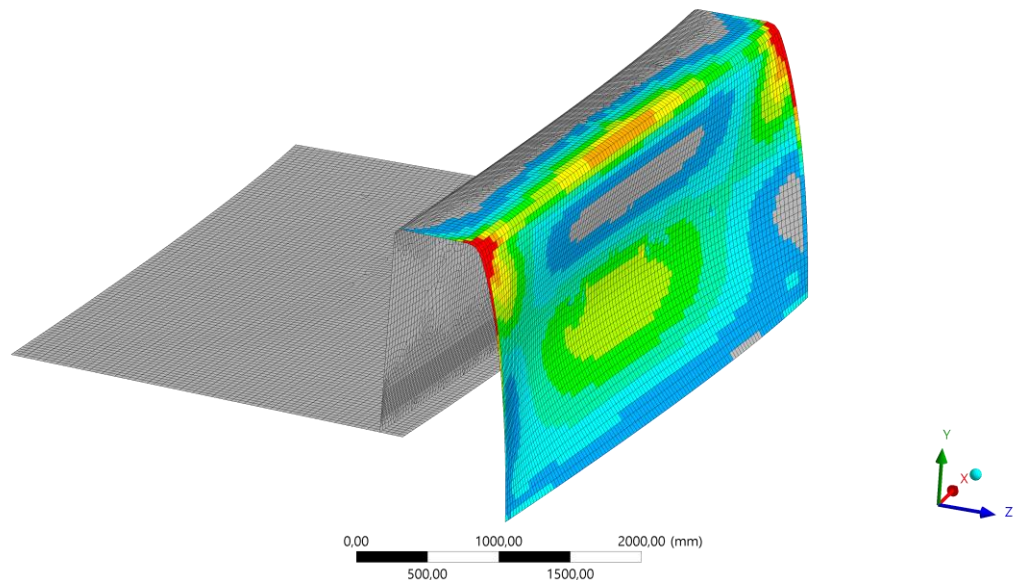


Abbildung 18: Prinzipdarstellung globales FE-Modell eines FVK-Schanzkleids

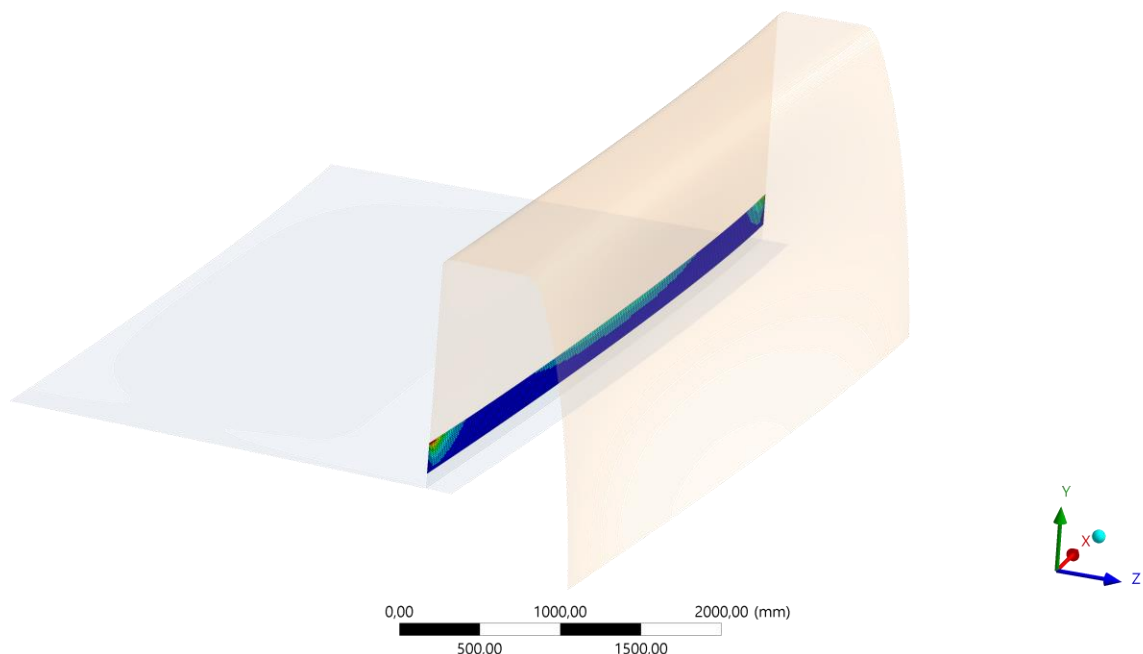


Abbildung 19: Prinzipdarstellung globales FE-Modell mit FAUSST-Ügezone

Prinzipiell wurde bei der Entwicklung des Entwurfsprozesses ein Verfahren angestrebt, in dem die FAUSST-Verbindung innerhalb des globalen FE-Modells der auszulegenden

Struktur möglichst effizient über Ersatzelemente mit homogenisierten, orthotropen Materialeigenschaften abgebildet wird. Wichtig ist dabei vor allem die Einhaltung von Qualitätsanforderungen an das FE-Netz im Bereich der FAUSST-Fügezone. Neben allgemein geltenden Vernetzungsregeln, die die Wahl des Elementtyps sowie der Elementgröße und -form bestimmen, ist die Ausbildung eines strukturierten FE-Netzes im FAUSST-Bereich erforderlich. Dabei sollte pro Materialzone (vgl. Abschnitt 2.2.1) mindestens eine Elementreihe vorhanden sein. Alle Elemente dieser Elementreihe erhalten entsprechend die für die Materialzone geltenden orthotropen Materialeigenschaften.

Die Materialeigenschaften werden aus den Erkenntnissen der Laborversuche (mechanische Tests) sowie der in AP200 beschriebenen, mikromechanischen RVE-Simulationen und Simulationen auf makroskopischer Ebene abgeleitet. Während die Elastizitätskennwerte der unterschiedlichen Materialzonen im FAUSST-Verbinder bereits mit guter Genauigkeit über die Simulation abgeschätzt werden können, bestehen in der Festigkeits- bzw. Versagensprognose noch Unsicherheiten im phänomenologischen Verständnis und somit auch der präzisen Simulation der Versagensmechanismen für unterschiedliche Beanspruchungsarten.

2.4 Evaluierung im Schiffbau-Maßstab

Um die AP200-Modelle und -Berechnungsmethoden auf einen großen Maßstab im Schiffbau anwenden zu können und gleichzeitig die Modellkomplexität, den Rechenaufwand und die Datenmenge für die Auswertung der Ergebnisse zu reduzieren, wurde ein parametrisches Modell mit der FAUSST-Verbindung entwickelt.

Zu diesem Zweck wurde in einem ersten Schritt ein Brainstorming durchgeführt, um mögliche Optionen für Anpassungen des Modells zu ermitteln. Es wurden Themen wie Material (Metall/Faserverbundwerkstoff, Materialeigenschaft, Orientierung und Materialzuweisung), Geometrie (globales Modell und FAUSST-Verbindung), Analyseinstellungen (Lastfall, Randbedingungen und Berechnungsmethode) usw. diskutiert.

In einem zweiten Schritt wurde die Struktur ausgewählt, die für die Untersuchung relevant ist. Das 20-Fuß-Containermodell wurde verwendet, um ein großmaßstäbliches Marinemodell darzustellen, und auch, weil es während des Projekts als Demonstrationsmodell diente. Bei der Weiterentwicklung des Modells wurde die Materialzuweisung definiert. Dann wurde eine Auswahl getroffen, welche Wände des Containers aus Faserverbundmaterial (GFK –

Glasfaserverbundwerkstoff) inkl. FAUSST-Verbindung bestehen sollten und für welche Wände ein Standardmaterial (Stahl oder Aluminium) verwendet werden sollt. Abbildung 20 zeigt das Containermodell und die Materialzuweisung.

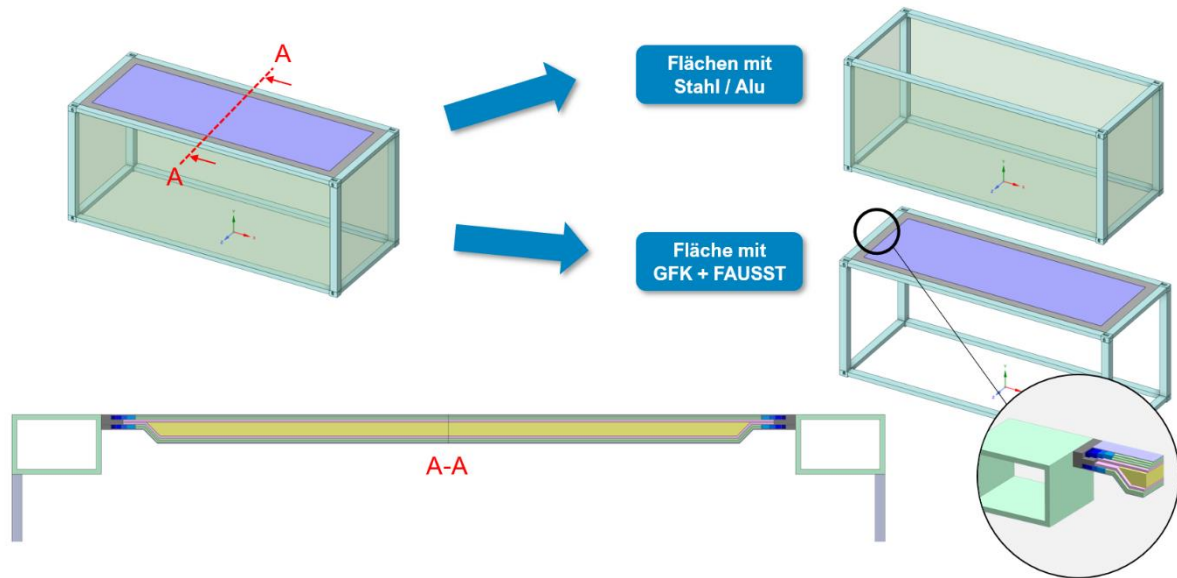


Abbildung 20: Materialzuweisungen im FAUSST-Demonstratormodell

Die Materialzuweisung spezifisch für die Verbindung Container – FAUSST – Sandwichkomponente ist in Abbildung 21 dargestellt. Die blauen Farbabstufung stellt die verschiedenen Abschnitte dar, die für die Modellierung von FAUSST erstellt wurden (Stahl, Hybrid 1, Hybrid 2 und Glas). Die graue Farbe repräsentiert das Stahlblech, das zur Verbindung der Rahmenprofile des Containers mit FAUSST verwendet wird. Der Bereich der GFK-Deckschichten sowie des Sandwichkerns sind ebenfalls dargestellt und farblich gekennzeichnet.

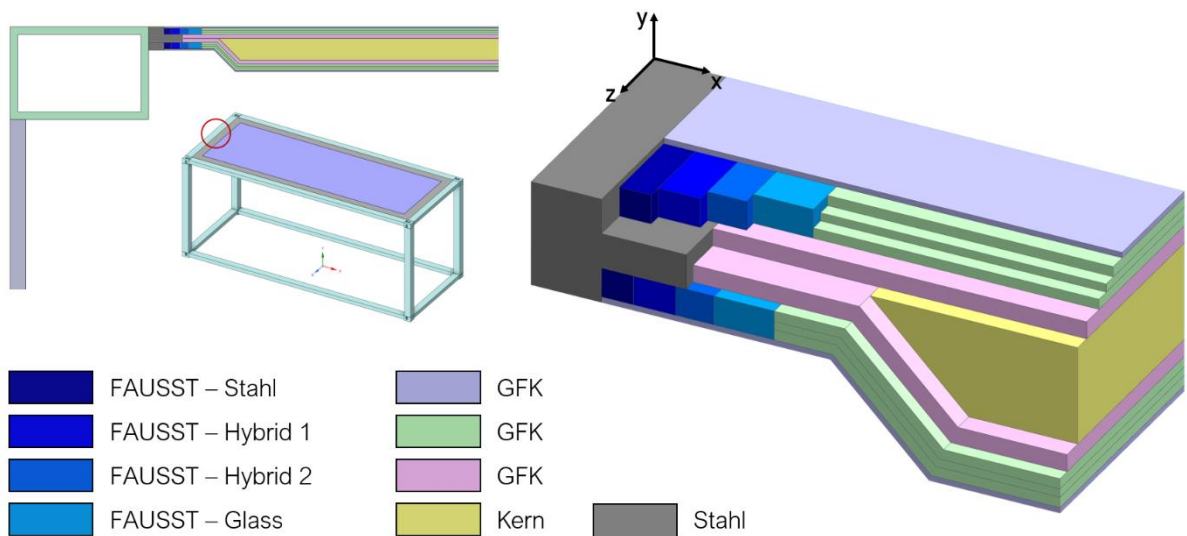


Abbildung 21: Aufbau des Hybridmaterials im FAUSST-Demonstratormodell

Nach Abschluss der Definitionen der grundlegenden Anforderungen wurde der Prozess der Parametrisierung eingeleitet. Für dieses spezifische Verfahren wurde es in drei Stufen unterteilt: 3D-Modellierung, Modelleinstellung und Post-Processing (Ergebnisauswertung und -darstellung).

In der ersten Stufe des Parametrisierung wurde evaluiert, welche Dimensionen des Modells über steuerbare Parameter abgebildet werden sollten. Dies erfolgte in enger Abstimmung mit den Projektpartnern. Wie in Abbildung 22 dargestellt, wurden die Stahlblechhöhe (a_1/a_2 , b_1/b_2), die den Container mit dem FAUSST verbindet, der Abstand vom FAUSST zum Kern (c), die Dicke des Kerns (d_1) und auch die Länge jeder Materialzone von FAUSST (e , f , g und h) parametrisiert. Darüber hinaus wurde auch die Wahl der Materialien (Materialeigenschaften - 1.01, 1.5, 2.1, Core) parametrisiert.

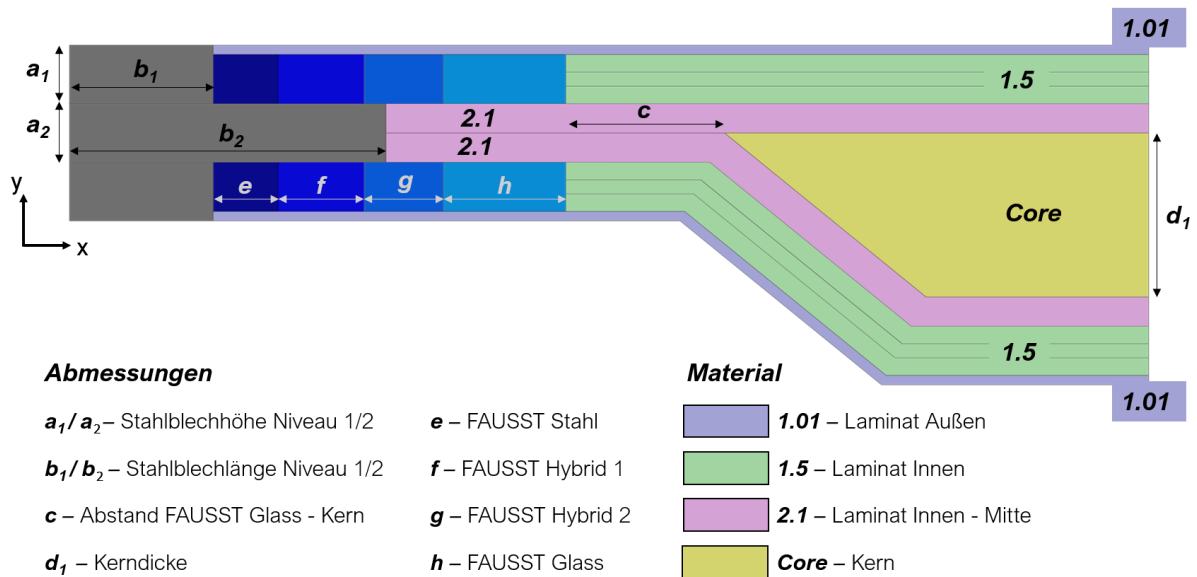


Abbildung 22: Design-Parameter im Materialaufbau des FAUSST-Demonstratormodells

Da die Belastungen und die Randbedingungen eines Containers je nach Anwendung der Struktur sehr unterschiedlich sein können, kann ein hoher Aufwand erforderlich werden, um die Simulation an den jeweiligen Fall anzupassen. Daher wurden in der zweiten Stufe (Modelleinstellung) die Belastungskonfiguration sowie die Definition von Randbedingungen parametrisiert, wie beispielhaft in Abbildung 23 dargestellt. Auch die Analyseeinstellungen wurden parametrisiert, da die für die Berechnungsmethode verwendete Lösung sowohl linear als auch nichtlinear sein kann.

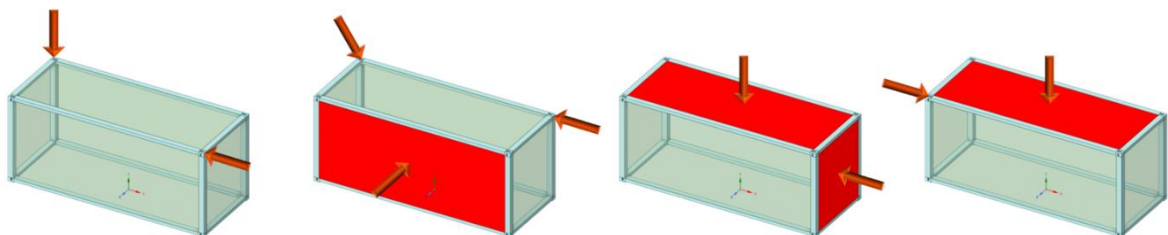


Abbildung 23: Beispielhafte Kräfteinwirkungen auf das FAUSST-Demonstratormodell

In der letzten Stufe, dem Post-Processing, wurden schließlich alle relevanten Ergebnisauswertungen der Simulation parametrisiert, wie in Abbildung 24 zusammenfassend dargestellt. Aufgrund der großen Anzahl der möglichen auszuwertenden Ergebnisse und des damit verbundenen Rechenaufwands wurde durch die Automatisierung der Ergebnisauswertung der Zeitaufwand für diesen Prozess um bis zu 70% reduziert. So können strukturell relevante Ergebnisse wie Spannungs- und Dehnungsverteilungen aber

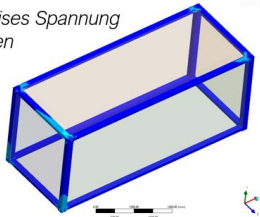
auch nutzerspezifische Ergebnisgrößen direkt ausgewertet werden, ohne dass eine zeitaufwändige, manuelle Auswertung erforderlich ist.

- Auswertung aller Komponenten
- Untersuchung von
 - Verformungen
 - Spannungen
 - IRFs:

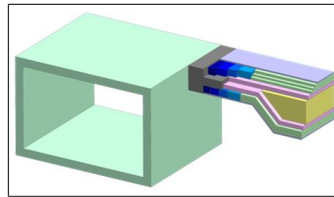
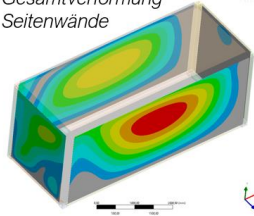
$$IRF = \frac{1}{RF} = \frac{\text{vorhandene Spannung}}{\text{zulässige Spannung}}$$

*Reservfaktor (RF)

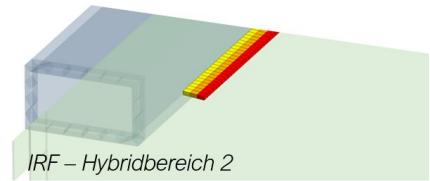
Von Mises Spannung
Rahmen



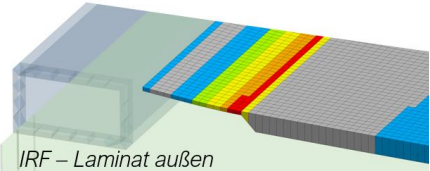
Gesamtverformung
Seitenwände



IRF – Hybridbereich 2



IRF – Laminat außen



Gesamtverformung Deckschicht

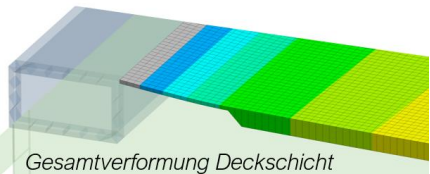


Abbildung 24: Post-Processing der Simulationsergebnisse im FAUSST-Demonstratormodell

Schließlich wurden mit diesem parametrischen Modell die AP200-Modelle und -Methoden an den Schiffbaumaßstab angepasst und eine hohe Effizienz der gesamten Simulationskette erreicht - von der Modellerstellung bis zur Auswertung der Ergebnisse.

3 Zusammenfassung & Fazit

Die von der ar engineers GmbH im Teilvorhaben durchgeführten Arbeiten im Verbundprojekt Hy-FiVE sind in drei Arbeitspakete gegliedert, wobei die inhaltliche Unterteilung im Einklang mit den global definierten Arbeitspaketen des Projektkonsortiums im Verbundprojekt ist.

Im ersten Arbeitspaket AP100 wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern unterschiedlichste innovative Konzepte von klebfreien Technologien zum Fügen von Faserverbundwerkstoffen mit Metallen im Hinblick auf schiffbauliche Anwendungsfälle bewertet. Durch die Erstellung eines konkreten Anforderungskatalogs im AP100 konnten neue Erkenntnisse zu den fachübergreifenden, schiffbauspezifischen Anforderungen von Verbindungselementen identifiziert werden. Mithilfe der eingehenden Analyse von schiffbaulichen Anwendungsfällen wie z.B. Balkonstrukturen, Passagierkabinen, FVK-Decksaufbauten oder Außenhauttüren konnte ein möglichst breites Anforderungsprofil an entsprechende Verbindungslösungen erstellt werden. Die Anforderungen wurden anhand der Regelwerke der Klassifikationsgesellschaften Bureau Veritas, Det Norske Veritas, Lloyd's Register und American Bureau of Shipping definiert. Es wurden insgesamt acht unterschiedliche Technologiekonzepte untersucht. Zur systematischen Evaluation aller Konzepte wurde eine Bewertungsmatrix erstellt, die die zuvor definierten schiffbaulichen Anforderungen sowie allgemeine Anforderungen im Bereich Konstruktion, Herstellung, Belastung, Umwelteinflüsse und Zertifizierung berücksichtigt. Innerhalb des Bewertungsverfahrens wurde vom Konsortium u.a. die Weiterverfolgung der FAUSST-Technologie beschlossen, die in den folgenden Arbeitspaketen im Fokus der Untersuchungen für das Teilvorhaben der ar engineers GmbH stand.

Im Rahmen des zweiten Arbeitspakets AP200 wurden umfangreiche Arbeiten zur strukturmechanischen Charakterisierung der FAUSST-Technologie mittels numerischer Simulation durchgeführt. Fokus der Arbeiten lag dabei zum Einen auf der geometrischen Modellierung des hybriden Stahl-Glasfasergewirks, zum anderen auf der Prognose der mechanischen Eigenschaften wie Elastizitätskennwerten und nominellen Festigkeiten des Verbundmaterials durch Finite-Elemente-Simulationen. Ziel waren der Erkenntnisgewinn zum verbesserten Verständnis über das strukturmechanische Verhalten von FAUSST sowie die Erzeugung von orthotropen Materialkennwerten zur Nutzung in der rechnerischen Auslegung und Nachweisführung von mit FAUSST gefügten Faserverbund-Metall-Baugruppen im schiffbaulichen Einsatz. Die initial durchgeführten Untersuchungen im Bereich der geometrischen Modellierung haben gezeigt, dass eine 3D-Modellierung des FAUSST-

Gewirks und Überführung in qualitativ hochwertige Finite-Elemente-Modelle mit dem Open Source Werkzeug TexGen während der Projektlaufzeit nicht mit dem angestrebten Detailgrad möglich war. Eine voxelbasierte Vernetzung der Gewirkstruktur führte für Festigkeitsprognosen nicht zu den erwarteten Ergebnissen. Ein alternativer Modellierungsansatz mithilfe der kommerziellen Softwarepakete SolidWorks und Ansys Mechanical wurde gewählt, um die Analysen fortzuführen und so die rechnerische Bestimmung der orthotropen Elastizitätskennwerte des FAUSST-Verbundmaterials erfolgreich abzuschließen. Des Weiteren konnten im AP200 wertvolle Erkenntnisse zu den Wärmeleitungseigenschaften des FAUSST-Verbinders während des Schweißprozesses gewonnen werden. Hierzu wurden transiente thermische Analysen in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner SLV Halle durchgeführt, um den Wärmeeinfluss auf die Glasfaserschicht des FAUSST-Textils im eingebetteten Zustand zu untersuchen. Die experimentell ermittelten Daten konnten mithilfe der Simulationen validiert werden.

Ziel des dritten Arbeitspakets AP500 waren die Optimierung der in AP200 aufgebauten Modellierungs- und Berechnungsverfahren sowie die Skalierung der Ansätze zur Auslegung und Nachweisführung auf den schiffbaulichen Maßstab. Der im Konsortium entworfene Demonstrator eines mittels Faserverbundwerkstoffen und Stahl konstruierten Hybridcontainers diente dabei als Fallbeispiel. Hierfür konnte ein in hohem Maße parametrisierter, teilautomatisierter FEM-Prozess im Rahmen der kommerziellen Simulationsumgebung Ansys Mechanical zur strukturmechanischen Berechnung des Containers inklusive FAUSST-Verbindungsstellen erarbeitet werden. Dabei wurde die hybride Fügezone zwischen Faserverbund- und Stahlstruktur über entsprechend homogenisierte finite Elemente mit orthotropen Materialeigenschaften modelliert. Diese Materialeigenschaften wurden mithilfe der Erkenntnisse aus den Simulationen in AP200 sowie der experimentellen Daten, die durch die Projektpartner FIBRE und SKZ erzeugt wurden, bestimmt. Dies diente zur Darstellung der Machbarkeit für effiziente Simulationsverfahren zur Auslegung und Nachweisführung größerer Strukturbaugruppen, die mittels FAUSST-Verbinder gefügt werden.

Im Rahmen des Hy-FiVE-Projekts konnten wesentliche Erkenntnisse aus den durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gewonnen werden, die für die Entwicklung von industriell anwendbaren Fügmethoden wie der FAUSST-Technologie als vielversprechend und zukunftsweisend bewertet werden. Neben den umfangreichen experimentellen Untersuchungen am FAUSST-Verbinder durch die Projektpartner konnte ebenfalls durch den

hohen Grad an simulationsgestützter Charakterisierung im Projekt sichergestellt werden, dass das mechanische Verhalten von FAUSST als kraftübertragende Verbindung tiefgreifend verstanden und die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Sicherheit der Verbindung greifbar sind. Dies ist eine fundamentale Voraussetzung für die Zertifizierbarkeit des FAUSST-Verbinders und mittels FAUSST gefügten Faserverbundbauteilen in Schiffbaustrukturen. Insbesondere zur Minimierung von praktischen Prüfaufwänden und den damit verbundenen Kosten seitens der Werften, Entwicklungsbüros, Materiallieferanten und Bauteilhersteller stellen simulationsbasierte Verfahren zur Auslegung und Nachweisführung solcher Strukturen auf Basis der Projektergebnisse einen nennenswerten Vorteil dar.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die im Verbundprojekt erarbeiteten Lösungen einen bedeutenden Beitrag zur Weiterentwicklung innovativer Strukturkonzepte im Schiffbau leisten und so den Leichtbau unter Einsatz von Faserverbundwerkstoffen im Schiffbau nachhaltig stärken werden.

Literaturverzeichnis

- [Aboudi2013] J. Aboudi, B. A. Bednarczyk, S. M. Arnold, „*Micromechanics of Composite Materials: A Generalized Multiscale Analysis Approach*“, Elsevier, 2013
- [Barbero2017] E.J. Barbero, M. Shahbazi „*Determination of Material Properties for ANSYS Progressive Damage Analysis of Laminated Composites*“, Composite Structures, 176:768-779, 2017
- [BV2022] Bureau Veritas, NR 467 „*Rules for the Classification of Steel Ships*“, 2022
- [BV2002] Bureau Veritas, NR 396 UNITAS R02 E „*Rules for the Classification of High Speed Craft*“, 2002
- [BV2021] Bureau Veritas, Rule Note NR 546 DT R03 E „*Hull in Composite Materials and Plywood, Material Approval, Design Principles, Construction and Survey*“, 2021
- [Cho2020] C. Cho, Y. Chen, V. K. Dhimole, „*Modeling and Two-Step Homogenization of Aperiodic Heterogenous 3D Four-Directional Braided Composites*“, Journal of Composites Science, 4(4):179, MDPI, 2020
- [DNV2023a] DNV AS, „*Rules for classification: Ships (RU-SHIP)*“, 2023
- [DNV2023b] DNV AS, „*Rules for classification: High speed and light craft (RU-HSLC)*“, 2023
- [DNV2023c] DNV AS, „*Rules for classification: Yachts (RU-YACHT)*“, 2023
- [Fagiano2012] C. Fagiano, Emmanuel Baranger, P. Ladeveze, Martin Genet. „*Numerical tools for the mesoscale modeling of thermostructural woven composites.*“ 15th European Conference on Composite Materials (ECCM15), Jun 2012, Venedig, Italien
- [Hashin1980] Z. Hashin, "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites", *J. of Applied Mechanics*, 47:329 – 334, ASME, 1980
- [Hill1983] R. Hill, „*The Mathematical Theory of Plasticity*“, New York: Oxford University Press, 1983
- [Kaminski2005] M.M. Kaminski, „*Computational Mechanics of Composite Materials*“, Springer, 2005
- [Li2018] W. Li, Y.J. Jia, L. X. Li, „*A Two-Scale Approach to Numerically Predict the Strength and Degradation of Composites*“, Applied Composite Materials, Springer, 2018

- [Lapczyk2007] I. Lapczyk, J.A. Hurtado „*Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials*“, Composites Part A 38, Elsevier, 2007
- [LR2019a] Lloyd's Register Group Limited, „*Rules and Regulations for the Classification of Ships*“, 2019
- [LR2019b] Lloyd's Register Group Limited, „*Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft*“, 2019
- [Milne2003] I. Milne, Robert O. Ritchie, B. L. Karihaloo, „*Comprehensive Structural Integrity*“, Elsevier, 2003
- [Schürmann2007] H. Schürmann, „*Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*“, 2., bearbeitet und erweiterte Auflage, Springer, 2007
- [Singh2016] C.V. Singh, R. Talreja, „*A multiscale approach to modeling of composite damage*“, Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials, 329-345, Woodhead Publishing, 2016
- [Wan2023] Wan, Lei & Ismail, Yaser & Sheng, Yong & Yang, Dongmin, „*A review on micromechanical modelling of progressive failure in unidirectional fibre-reinforced composites*“, Composites Part C: Open Access, 2023