

Entwicklung eines Faser-Kunststoff-Verbund- Werkstoffs als Auflager für ein LNG-Tanksystem

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik

der Universität Rostock

vorgelegt von

Kai Ehrich, geboren am 06.06.1985 in Schwerin

Rostock 29.08.2016

Prof. Dr.-Ing. Martin-Christoph Wanner
Universität Rostock, Lehrstuhl Fertigungstechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Paschen
Universität Rostock, Lehrstuhl für Meerestechnik

Datum der Einreichung

29.08.2016

Datum der mündlichen Verteidigung:

24.02.2017

Abkürzungsverzeichnis	3
Formelzeichenverzeichnis	4
1 Einleitung	6
1.1 Problemstellung	6
1.2 Zielstellung und Aufbau der Arbeit	8
2 Auflagersysteme in der schiffbaulichen Praxis	10
2.1 Technologie der Auflagersysteme	10
2.2 Grundsätzliche Anforderungen an Auflager	12
2.2.1 Mechanische Belastungen	13
2.2.2 Thermische und mediale Belastungen	15
2.3 Entwicklungsdefizite	16
3 Konzept zur Entwicklung eines Auflagerwerkstoffs	17
4 Definition von Anforderungen an Auflagerwerkstoffe	22
4.1 Mechanische Belastungen der Auflagersysteme an praktischen Beispielen	22
4.1.1 Prismatischer Tank Typ-B	22
4.1.2 Zylindrischer Tank Typ-C	27
4.2 Thermische Belastungen der Auflager an praktischen Beispielen	31
4.3 Zusammenfassung der Belastungen an Auflagern	35
5 Nutzung von FKV-Werkstoffen als Auflager für LNG-Tankschiffe	36
5.1 Faserkunststoffverbunde	36
5.1.1 Fertigungsverfahren von Faserkunststoffverbunden	37
5.1.2 Matrixsysteme	38
5.1.3 Verstärkungsfasern	41
5.1.4 Zusätzliche Füllstoffe - thermisch isolierend	44
5.2 Auswahl experimenteller Versuche zur Untersuchung der Eignung von FKV- Werkstoffen als Auflagermaterial	47
5.3 Zusammenfassung der Nutzung von FKV-Werkstoffen	49
6 Entwicklung eines FKV-Auflagersystems	50
6.1 Erprobung von Fertigungsverfahren	50
6.1.1 Gießverfahren/Einrühren	50
6.1.2 Vakuuminfusionsverfahren	52
6.1.3 Vakuuminfusionsverfahren mit RTM	56
6.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Fertigungsverfahren	57
6.2 Qualifizierung eines Matrixsystems	57
6.2.1 Untersuchung der exothermen Reaktion mit der dynamischen Differenz Kalorimetrie (DSC) - Energiefreisetzung	58
6.2.2 Bestimmung der Topfzeiten unter Raumtemperatur und variierenden Temperaturen mithilfe rheologischer Untersuchungen	59
6.2.3 Ermittlung des Einflusses des Temperungsprozesses auf die Aushärtung und die mechanischen Eigenschaften eines Matrixsystems	61
6.2.4 Dynamisch-Mechanische-Analyse zur Bestimmung des Temperatureinsatzbereichs	64
6.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Qualifizierung des Matrixsystems	66
6.3 Qualifizierung von Fasern und isolierenden Füllstoffen	66
6.3.1 Eigenschaften festigkeitssteigernder Glasfasern	67
6.3.2 Eigenschaften Blähglasgranulat - Poraver	70
6.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Qualifikation der Fasern und den isolierenden Füllstoffen	72
6.4 Experimentelle Qualifizierung des FKV-Werkstoffs	72

6.4.1	Kurzzeitdruckfestigkeit	73
6.4.2	Langzeitdruckfestigkeit.....	75
6.4.3	Scherfestigkeit.....	77
6.4.4	Mediale Alterung	80
6.4.5	Schwingfestigkeitsuntersuchungen	86
6.4.6	Wärmeleitfähigkeit.....	92
6.4.7	Wärmeausdehnungskoeffizient.....	93
6.4.8	Faservolumengehalt.....	94
6.4.9	Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen	97
7	Verifizierung analytischer Modelle mit experimentellen Untersuchungen.....	99
7.1	Analytisches Berechnungsmodell nach der Mischungsregel für mechanische Belastungen	99
7.2	Analytischer Ansatz zur Bestimmung von Wärmeleitfähigkeiten in einem FKV-Werkstoff.....	102
7.3	Verhalten von FKV-Werkstoffen beim Einsatz festigkeitssteigernder und isolierender Füllstoffe	105
7.4	Bewertung der Eignung analytischer Berechnungsmodelle zur Prognose	106
8	Abgleich der Entwicklungsschritte mit den Anforderungen zur Zielerreichung.....	108
8.1	Vergleich der mechanischen Anforderungen	109
8.2	Vergleich der thermischen und medialen Anforderungen.....	111
8.3	Zusammenfassung des Abgleichs der Entwicklungsschritte	112
9	Fertigung eines Versuchsmusters	113
9.1	Auswahl und Beschreibung des Auflagermodells	113
9.2	Entwicklung, Konstruktion und Bau einer Form	114
9.3	Auslegung einer Kühlung der Form während des Infusionsprozesses und der Aushärtung	114
9.4	Werkstoffzusammensetzung und Besonderheiten bei der Großskalierung	115
9.5	Konzeption des Herstellungsprozesses (Vakuuminfusion, VARTM)	116
9.6	Nachbearbeitung des Versuchsmusters.....	118
9.7	Zusammenfassung der Versuchsmusterherstellung	119
10	Zusammenfassung	120
11	Literaturverzeichnis	125

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
B	Breite
D	Durchmesser
DMA	Dynamische Mechanische Analyse
DSC	Differential Scanning Calorimetry
ECA	Emission Control Area
EP	Epoxid
E-Glas	Elektro-Glas
FKV	Faserkunststoffverbund
FVG	Faservolumengehalt
GL	Germanischer Lloyd
H	Höhe
IGC	International Gas Carrier Code
IMO	International Maritime Organization
L	Länge
LN ₂	Flüssiger Stickstoff
LNG	Liquefied Natural Gas
LR	Lloyds Register
LVE-Bereich	Linear-viskoelastischer Bereich
LW	Lastwechsel
M [%]	Masseprozent
MA	Methylacrylat
PIR	Polyisocyanurat
PUR	Polyurethan
RT	Raumtemperatur
r.F.	relative Luftfeuchtigkeit
Stk.	Stück
T _g	Glasübergangspunkt
TTT	Time-Temperature-Transition
UP	Ungesättigtes Polyesterharz
VE	Vinylesterharz
VOL. [%]	Volumenprozent

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
Kleinbuchstaben		
a_{xx}	s^2	Beschleunigung in Längsrichtung
a_{yy}	s^2	Beschleunigung in Vertikalrichtung
a_{zz}	s^2	Beschleunigung in Querrichtung
b	mm	Kreisbogenlänge
d_a	mm	beliebiger Korndurchmesser zwischen 0 und D
δ	mm	Wanddicke zwischen zwei Systemen
δ_V	°	Phasenverlustwinkel
ε_D	%	Druckstauchung eines Werkstoffs
f_{xx}	N	Kraft in Längsrichtung
f_{yy}	N	Kraft in Vertikalrichtung
\hat{f}_{yy}	N	Statische Kraft in Vertikalrichtung
f_{zz}	N	Kraft in Querrichtung
λ	W/m·K	Wärmeleitfähigkeit
λ_f	W/m·K	Wärmeleitfähigkeit Füllstoff
λ_V	W/m·K	Wärmeleitfähigkeit FKV-Werkstoff
λ_M	W/m·K	Wärmeleitfähigkeit Matrix
m_t	kg	Masse des Tanks in Kilogramm
n	-	Körnungsexponent
η	Pas	Viskosität
μ_0	-	Reibkoeffizient
ρ	g/cm ³	Dichte
φ	-	Faservolumengehalt
φ_{BL}	Vol. [%]	Volumenanteil Füllstoff Blähglasgranulat
φ_F	Vol. [%]	Volumenanteil Füllstoffe
φ_{GF}	Vol. [%]	Volumenanteil Füllstoff Glasfaserstäbe
φ_L	Vol. [%]	Volumenanteil Füllstoff Luft
σ_E	MPa	Druckfestigkeit Epoxidharz
σ_V	MPa	Druckfestigkeit FKV-Werkstoff
σ_{Zug}	MPa	Zugfestigkeit
σ_B	MPa	Biegefestigkeit
σ_D	MPa	Druckfestigkeit
s	mm	Knicklänge
τ_{SL}	MPa	Scherfestigkeit Tank in Längsrichtung
τ_{SQ}	MPa	Scherfestigkeit Tank in Querrichtung
$\Delta\vartheta$	K	Temperaturgefälle zwischen zwei Systemen
τ	MPa	Scherfestigkeit
q_L	N/mm	Linienlast in Längsrichtung
t_w	h	Wirkzeit

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
Großbuchstaben		
A	-	Siebdurchgang bei Sieblochweite d_a
$A_{K50\%}$	-	Abminderungsfaktor dynamisch Klimazyklus nach 10^7 LW
$A_{R50\%}$	-	Abminderungsfaktor dynamisch Referenzstäbe nach 10^7 LW
$A_{rS50\%}$	-	Abminderungsfaktor dynamisch reduzierte Stabanzahl nach 10^7 LW
$A_{T50\%}$	-	Abminderungsfaktor dynamisch Tanksimulation nach 10^7 LW
A_w	-	Abminderungsfaktor Wärmeleitfähigkeitsberechnungsmodell
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul; Zugsteifigkeit eines Werkstoffs
E_F	MPa	Zugsteifigkeit Faser
E_{II}	MPa	Zugsteifigkeit FKV-Werkstoff
E_M	MPa	Zugsteifigkeit Matrix
E^*	Pa	komplexer Elastizitätsmodul
E'	Pa	Speichermodul
E''	Pa	Verlustmodul
F	N	Kraft
G^*	Pa	komplexer Schubmodul
G'	Pa	Speichermodul
G''	Pa	Verlustmodul
I	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment
R	-	Spannungsverhältnis zwischen Ober- und Unterlast bei Schwingfestigkeitsprüfung
$R_{ }$	MPa	Festigkeit eines FKV-Werkstoffs parallel
$R_{F }$	MPa	Festigkeit Fasern parallel
\dot{Q}	W	Wärmestrom
V	cm ³ , m ³	Volumen

1 Einleitung

Die Nutzung alternativer fossiler Energiequellen wird insbesondere durch die Verwendung der Brückenenergiequelle Gas bestimmt. Gas ist als fossiler Brennstoff definiert, weist aber im Vergleich zu Öl einen um 25 % reduzierten CO₂-Ausstoß auf [1] und soll, laut Schätzungen der Weltenergiebehörde, noch ca. 300 Jahre vorrätig sein [2]. Auf Landwegen wird das Gas durch Pipelines von der Förderstelle bis zu den Abnehmern transportiert. Für den Transport auf Seewegen wird dieses durch eine Absenkung der Mediumtemperatur auf -163 °C verflüssigt und als Liquefied Natural Gas (LNG) transportiert. Das verflüssigte Gas weist eine um das 600fache erhöhte Dichte auf, wodurch der Transport wirtschaftlich attraktiv gestaltet werden kann [3]. Um die Fixkosten des Transports zu senken, werden die LNG-Tankschiffe immer größer und erreichen heute Volumen von bis zu 260.000 m³ (vgl. Abbildung 1) [4]. Neben dem Transport in großen Tanks wird LNG in der Schifffahrt auch als alternativer Treibstoff eingesetzt. Die Einführung von Emission Control Areas (ECA) in Nordeuropa (Ostsee, Nordsee) und Nordamerika zwingt die Schiffsreedereien auf alternative und kostengünstige Antriebsstoffe für Schiffe umzusteigen. Dazu werden die Schiffe mit zusätzlichen Treibstofftanks ausgerüstet, die einen Betrieb innerhalb der ECAs mithilfe von LNG ermöglichen, so dass Emissionen von Stick-, Schwefel- und Kohlendioxiden deutlich verringert sowie eine vollständige Vermeidung der Feinstaubproduktion erreicht werden können. Dabei haben die LNG-Treibstofftanks sehr viel kleinere Volumina (von 33 m³ bis zu 1000 m³) als LNG-Transporttanks [5].



Abbildung 1: LNG-Transportschiff - Typ Moss (li.), LNG Treibstofftanks für einen Schiffsantrieb (re.)

Aufgrund der sehr geringen Temperaturen von -163 °C ist die wichtigste Eigenschaft der Tanks, das Ladungsgut isoliert gegenüber der Umwelt zu transportieren, so dass es zu keiner Regasifizierung (Boil-Off) des LNGs kommt. Ein entstehender Boil-Off würde einen Verlust des Ladungsguts (bei Ablassen oder Verbrennen des regasifizierten Gases), einen Druckanstieg (Erhöhung des Transportrisikos) oder aber einen erneuten energie- und damit kostenaufwendigen Verflüssigungsprozess nachsichziehen. Deshalb werden die Tanks sehr aufwendig mit verschiedenen technischen Systemen isoliert.

1.1 Problemstellung

Die thermische Isolierung der LNG-Tanks wird über Isolierpaneele, die mithilfe von PUR/PIR oder Vakuumisulationspaneelen ausgestattet sind, gewährleistet. Die Tanks sind damit gegen große Temperaturunterschiede (Temperaturdifferenz zwischen Tankinhalt und Umgebungstemperatur) und einem damit verbundenen Wärmeeintrag geschützt. Die Tanksysteme werden von der IMO in verschiedene Klassen eingeteilt. Als eine Tankklasse werden bspw. unabhängige, eigenständige Tanksysteme mithilfe von Lagern/Auflagern gegenüber der Schiffsstruktur abgestützt. An den Positionen der Auflager kann keine Isolierung durch Isolationspaneele

realisiert werden. Somit müssen die Auflager in diesen Bereichen neben der Aufgabe des mechanischen Lastabtrags ebenfalls die thermische Isolation übernehmen (vgl. Abbildung 2). Damit bilden die Auflager die Schnittstelle zwischen dem Tank und der Schiffsstruktur. Seit der Inbetriebnahme des ersten Flüssiggastankers 1959 („METHANE PIONEER“) hat sich die Nutzung von Holz und später Kunstharzpressholz als Material für die Auflager bewährt und ist bis heute der Stand der Technik [6].

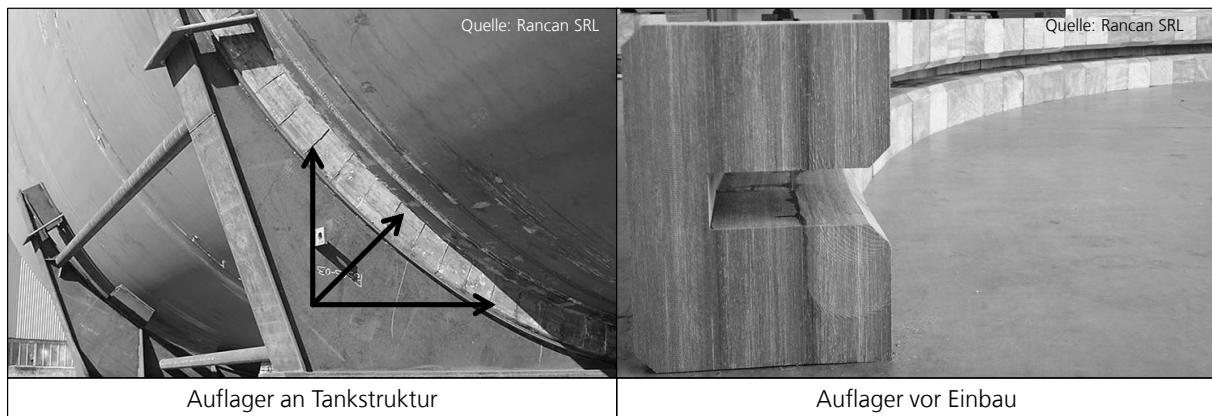


Abbildung 2: Holzaufleger in Einbausituation am Tank (li.), Auflager vor Einbausituation (re.)

Trotzdem sich das Kunstharzpressholz in der praktischen Anwendung auf Grund seiner mechanischen Festigkeiten und den Isolationseigenschaften bewährt hat, sind auch die nachfolgenden Defizite bekannt:

- Eine mangelnde Isolationsleistung führt zu einem erhöhten Wärmestrom in den Tank und dadurch zu einem erhöhten Boil-off des verflüssigten Gases im Tank.
- Die mangelnde Isolationsleistung kann zu einer durch Kälte verursachten Versprödung der umliegenden Schiffsstrukturen führen.
- Es können Vereisungen auf den Lagerwerkstoffen entstehen (siehe Abbildung 3).
- Aufplatzungen auf Grund von eingeschlossenem und gefrorenem Wasser können zu einer Beschädigung der Auflager und zu einer Destabilisierung der Tanklagerung führen.
- Es sind keine Modifikationsmöglichkeiten hinsichtlich der Verbesserung der Isolationswirkung des Kunstharzpressholzes verfügbar.

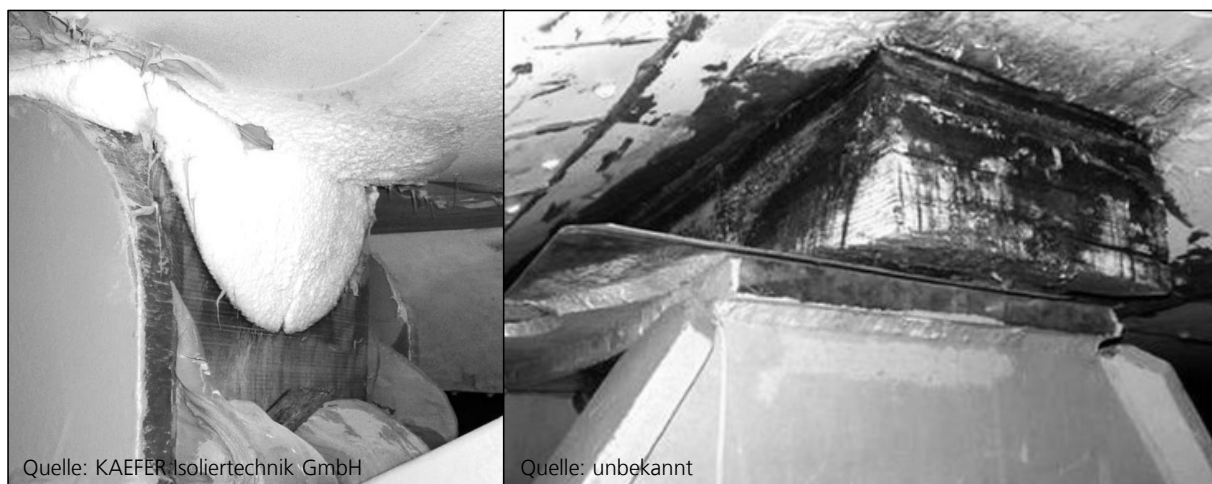


Abbildung 3: Vereistes Auflager (li.), durch Wasser beschädigtes Auflager (re.)

Eine materialeitige Weiterentwicklung des Kunstharzpressholzes zur Verbesserung der thermischen Eigenschaften sowie alternativ nutzbare Materialien für Auflagersysteme sind derzeit nicht bekannt.

1.2 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Abgeleitet aus der Problemstellung besteht das Ziel der Arbeit darin, einen alternativen Werkstoff zur Lagerung von LNG-Tankstrukturen mit verbesserten thermischen Isolationseigenschaften gegenüber dem Kunstharzpressholz zu entwickeln und zu qualifizieren. Die Idee für die Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojekts POLAR [7]. Die sich aus der Hauptzielstellung ergebenden Einzelziele lassen sich wie folgt definieren:

1. Bestimmung von Anforderungen an Auflagersysteme in LNG-Tankschiffen.
2. Ermittlung von möglichen Faser-Kunststoff-Verbund-Werkstoffen (FKV) für ein Auflagersystem.
3. Erprobung von Fertigungsverfahren für einen FKV-Werkstoff.
4. Festlegung einer Werkstoffzusammensetzung und experimentelle Ermittlung der Werkstoffeigenschaften.
5. Abgleich und Validierung der analytischen Berechnungsansätze mit den experimentellen Ergebnissen
6. Erprobung der Herstellung eines alternativen Auflagerwerkstoffs in einem Versuchsmuster.

Die Arbeit und deren Aufbau werden nachfolgend kurz vorgestellt. In **Kapitel 2** wird der Stand der Technik zu Auflagerwerkstoffen, die für LNG-Tankstrukturen genutzt werden, beschrieben. Aus dem Stand der Technik ergeben sich Entwicklungsdefizite, die durch die vorliegende Arbeit mithilfe eines FKV-Werkstoffs behoben werden sollen.

Abgeleitet aus dem Stand der Technik wird in **Kapitel 3** das Konzept zur Entwicklung und Qualifizierung eines FKV-Werkstoffs vorgestellt. Mithilfe einer Nutzwertanalyse wird die Auswahl eines FKV-Werkstoffs für ein Auflagersystem nachvollzogen. Die Nutzung von modifizierten EP-Matrixsystemen wird dabei präferiert.

Gegenstand des **Kapitels 4** ist die Darstellung aller theoretischen Überlegungen zur Entwicklung eines Auflagermaterials aus einem FKV-Werkstoff. Dazu werden die mechanischen und die thermischen Belastungen für Auflagersysteme an zwei exemplarischen LNG-Tank-Beispielen beschrieben.

In **Kapitel 5** werden für einen FKV-Werkstoff mögliche Fertigungsverfahren, Werkstoffe und Untersuchungsverfahren beschrieben und ausgewählt. Diese sollen eine zielgerichtete Entwicklung und die Qualifikation des FKV-Werkstoffs als LNG-Auflagersystem ermöglichen.

In **Kapitel 6** werden die theoretischen Überlegungen durch experimentelle Untersuchungen verifiziert. Die Untersuchungskomplexe sind schwerpunktmäßig auf die Erprobung von reproduzierbaren Fertigungsverfahren, die Untersuchung von mechanischen, thermischen und physikalischen Kennwerten sowie auf die Beständigkeit des FKV-Werkstoffs gegenüber schwingenden und medialen Belastungen ausgerichtet. Sämtliche experimentellen Untersuchungen sind darauf fokussiert, zu prüfen welche Auswirkungen der Einsatz von

Füllstoffen sowohl auf eine Epoxidharzmatrix als auch auf die Gesamtzielerreichung der Entwicklung eines FKV-Werkstoffs für ein Auflagersystem hat.

Die Möglichkeiten der Nutzung analytischer Berechnungsmodelle für die Bestimmung variierender Füllstoffzusammensetzungen in EP-Matrixsystemen werden in **Kapitel 7** untersucht. Dabei wird die Eignung aus der Literatur bekannter analytischer Berechnungsmodelle sowohl für die Berechnung von mechanischen Lasten als auch für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeitseigenschaften ermittelt. Weiterhin soll der Einfluss unterschiedlicher Füllstoffe und deren Auswirkungen auf die mechanischen und thermischen Eigenschaften des FKV-Werkstoffs dargestellt werden.

Abgeleitet aus diesen Untersuchungen wird im nachfolgenden **Kapitel 8** eine ideale FKV-Werkstoffzusammensetzung für ein Auflagersystem definiert. Die FKV-Werkstoffzusammensetzung wird mit den Anforderungen und den tatsächlichen Eigenschaften abgeglichen, um deren Eignung als Auflagermaterial abzuschätzen.

Den Abschluss der Untersuchungen stellt die Erprobung der Fertigung eines Versuchsmusters unter Laborbedingungen aus einem FKV-Werkstoff in **Kapitel 9** dar. Das Ziel der Fertigung ist die Ermittlung von Einflüssen auf und Unterschieden zwischen den Fertigungsverfahren bei großskalierten Bauteilen im Vergleich zu Probekörpern. Dabei orientiert sich das unter Laborbedingungen hergestellte Versuchsmuster an einem real verbauten Auflager eines Tanksystems aus Kunstharzpressholz.

In **Kapitel 10** soll durch eine Gegenüberstellung der formulierten Ziele mit den erreichten Ergebnissen die Eignung des FKV-Werkstoffs als Auflagermaterial nachgewiesen werden. Zusätzlich werden Thesen formuliert mithilfe derer die Erkenntnisse und Ergebnisse der Arbeit allgemeingültig zusammengefasst werden sollen.

2 Auflagersysteme in der schiffbaulichen Praxis

Zur Verdeutlichung der Thematik und der Problemstellung sollen die momentan genutzten Technologien der Auflagerwerkstoffe für LNG-Tanks beschrieben werden. Darüber hinaus stellt das folgende Kapitel die grundsätzlichen Anforderungen an einen Auflagerwerkstoff dar und leitet aus dem Stand der Technik sowie den Anforderungen die momentanen Entwicklungsdefizite ab.

2.1 Technologie der Auflagersysteme

Die Ladungstanksysteme bei Flüssiggastankern werden nach dem von der International Maritime Organization (IMO) veröffentlichten „*Internationalen Code für den Bau und die Ausrüstung von Schiffen zur Beförderung verflüssigter Gase als Massengut*“ kurz „*IGC*“ vorgenommen. Danach ergeben sich für die Tanksysteme die nachfolgend dargestellten Kategorien (vgl. Abbildung 4):

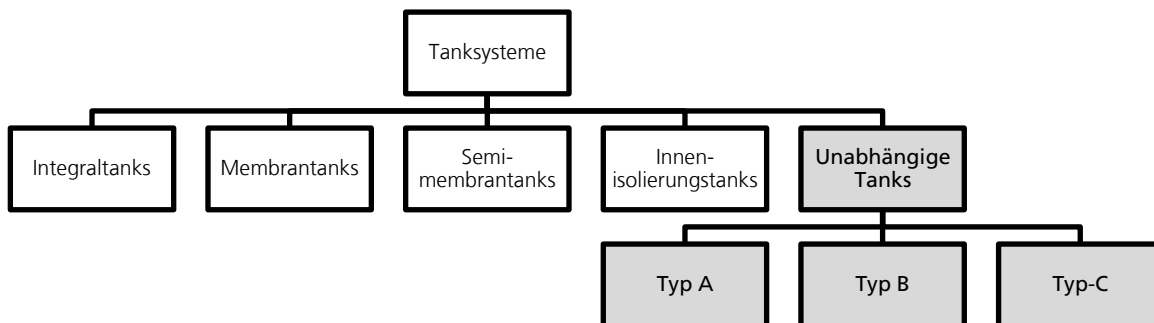


Abbildung 4: Aufteilung der Tanksysteme nach IMO-Code [8]

Bei den **unabhängigen Ladungstanksystemen** müssen zusätzliche Auflagersysteme in der Tankstruktur verbaut werden, um eine ausreichende Lastaufnahme zu gewährleisten. Die unabhängigen Tanksysteme sind somit selbsttragend und die Festigkeit der Schiffsstruktur ist nicht für die Festigkeit des Tanks verantwortlich [8]. Die unabhängigen Tanksysteme werden vom IGC in drei weitere Unterklassen eingeteilt (A, B, C). Diese drei Klassen unterscheiden sich hinsichtlich des zulässigen Betriebsdrucks und konstruktiver Merkmale. Alle Tanksysteme haben die Notwendigkeit der zwingenden Nutzung von Auflagern zur Abstützung des Tanks gegenüber der Schiffsaußenhaut gemeinsam. Dabei werden die Lager sowohl unter dem Tank als auch an den Seiten und auf dem Tank eingesetzt. Die häufigste Anwendung dieser Tanks ist als Mosskugeltanksystem [9], IHI SPB-Tanksystem [10] und als unabhängiger Fuel-Tank-Typ-C zur Versorgung von Schiffen mit LNG als Treibstoff [11]. Exemplarisch sind in Abbildung 5 drei Tanksysteme dargestellt.

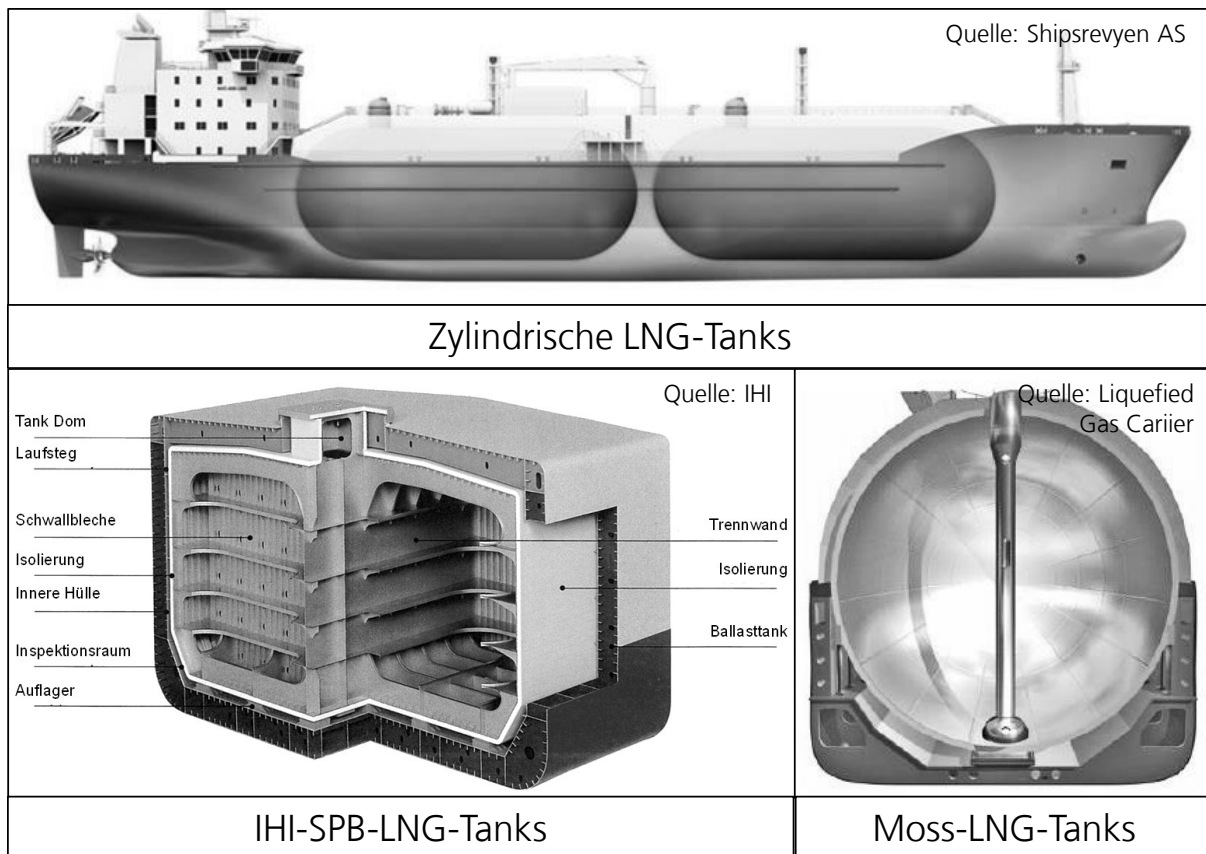


Abbildung 5: Tanksysteme für den LNG-Transport auf Schiffen

LNG-Auflagersysteme bestehen bereits seit der Inbetriebnahme des ersten Gas-Carriers („METHANE PIONEER“) im Jahr 1959 in den USA aus Holz. Die METHANE PIONEER war mit einem unabhängigen Tanksystem ausgestattet und transportierte zehn Jahre lang verflüssigtes Gas aus den USA nach England [6, 10]. Dabei kamen als Auflagerwerkstoff Balsahölzer zum Einsatz.

Die momentan genutzten Auflagerwerkstoffe bestehen aus Rotbuchenfurnieren, welche in mehreren Schichten unter Wärme und Druck zu einem Kunstharzpressholz verpresst werden. Dabei werden diese Holzwerkstoffe, welche bereits eine hohe Ausgangsfestigkeit besitzen, zusätzlich mit Phenolharz getränkt. Damit kann eine Imprägnierung gegen einen Feuchtigkeitseintritt sowie eine Anbindung der einzelnen Lagen aneinander gewährleistet werden [12]. Durch diesen Bearbeitungsschritt kann zusätzlich die Holzdruckfestigkeit um bis zu 20 % gesteigert werden [13]. Das Kunstharzpressholz wird in großen Blöcken hergestellt und anschließend in spanenden Verfahren endkonturnah zu Auflagerblöcken verarbeitet. Ein Einbau der Auflager aus Kunstharzpressholz findet während des Schiffsausrüstungsprozesses statt. Dabei wird das Kunstharzpressholz direkt vor dem Einbau des Tanks in die Schiffstruktur eingepasst und durch eine Ausgleichsmasse verklebt. Anschließend wird der Tank eingesetzt und bis zu einer vollständigen Aushärtung der Ausgleichsmasse über Stützkonstruktionen gehalten. Um größere Toleranzen zwischen dem Tank und dem Kunstharzpressholz auszugleichen, werden diese zusätzlich mit Holzeinlegern versehen und anschließend mit einer Epoxidharz-Klebstoffmasse¹ verklebt. Diese Klebstoffmasse dient neben dem Ausgleich von Toleranzen auch der Abtragung von entstehenden thermischen Spannungen durch Auf- und

¹ maximale Klebschichtdicke von 15 mm

Abkühlvorgänge sowie als dichtendes und vibrationsminderndes Medium [14]. Die weltweit genutzten Kunstharzpresshölzer für Auflagersysteme werden durch die Firmen Permali Deho Ltd. (Dehonit supports®), Röchling SE & Co. KG (Lignostone®) und Rancan SRL (Ranprex®) vertrieben [15, 16]. Fertigungsprozess und Einbauvorgang des Kunstharzpressholzes sind in Abbildung 6 dargestellt.

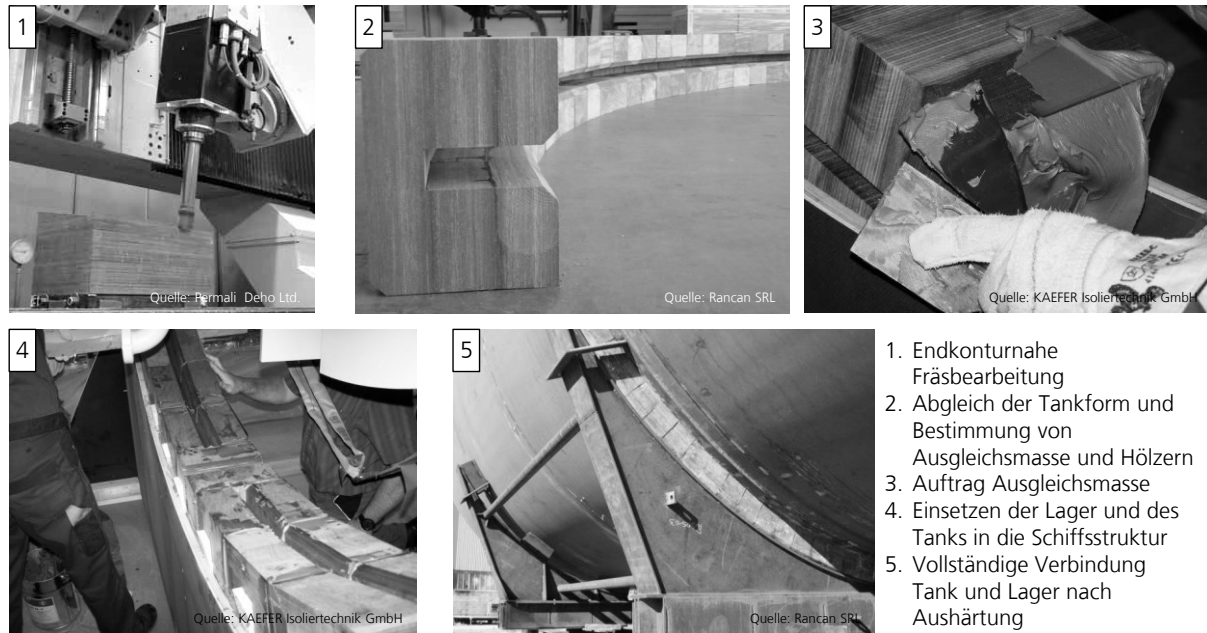


Abbildung 6: Fertigung und Einbauprozess von Kunstharzpressholz in Schiffsstrukturen

Neben den Kunstharzpresshölzern werden auch Auflagersysteme aus Epoxidharzen mit ungerichteten Füllstoffen (quasiisotroper Werkstoff) unter dem Markennamen DUROSTONE® bzw. NP500CR - CRYOGENIC G-10® vertrieben [17, 18]. Diese Auflager werden nicht zur Lagerung von Tanksystemen, sondern für die Lagerung von tiefkalten medienführenden Rohrsystemen und Befestigungen eingesetzt. Die Nutzung von Epoxidharz als Lagerwerkstoff bietet sich insbesondere an, da Epoxidharze unter tiefkalten Temperaturen bis -192 °C^2 eine Zunahme in ihrer Festigkeit verzeichnen [19].

2.2 Grundsätzliche Anforderungen an Auflager

Auflager für unabhängige Tanksysteme bestehen immer aus zwei verschiedenen Bauformen. Die Lager unterteilen sich in Fest- und Loslager. Dabei übernehmen die beiden Lagerformen variierende Aufgaben im Verbund. Das Festlager ist neben dem Lastabtrag in vertikaler Richtung (f_{yy}) ebenfalls für die Fixierung des Tanks gegenüber Längs- und Querkräften (f_{xx} ; f_{zz}), durch eine Schwertkonstruktion am Tank und eine entsprechende Aufnahme, verantwortlich. Das Loslager hingegen ist ausschließlich für einen Kraftabtrag in vertikaler Richtung (f_{yy}) verantwortlich und erlaubt dem Tank in Längs- und Querrichtung zu gleiten. Durch Ausdehnung und Schrumpfung des Tanks bei Auf- und Abkühlvorgängen können somit keine Eigenspannungen im Tanksystem entstehen. Eine Darstellung der beiden Auflagersysteme erfolgt in Abbildung 7.

² Temperatur von flüssigem Stickstoff – LN_2

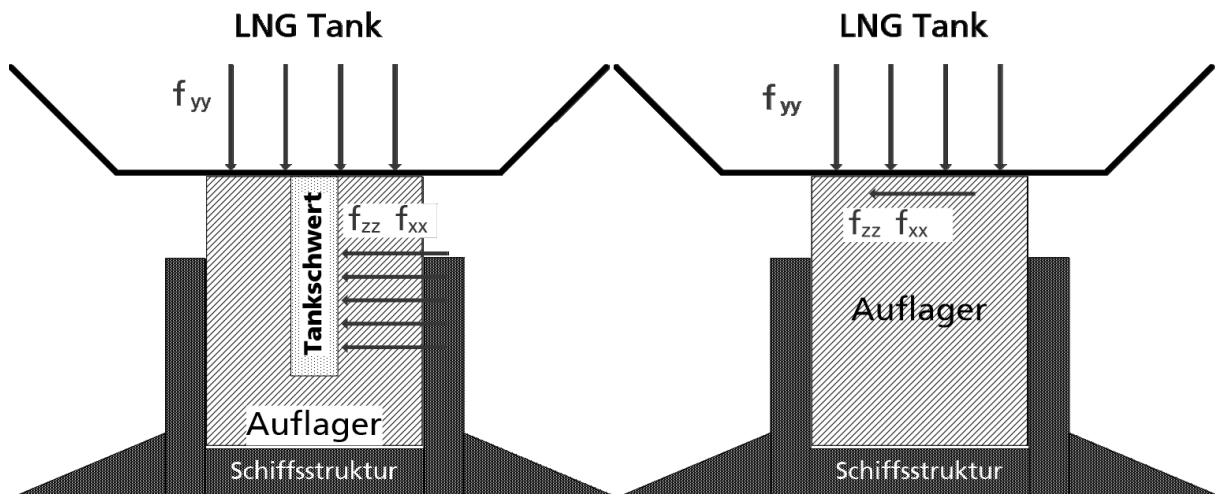


Abbildung 7: Fest- (li.) und Loslager (re.)

Die Loslager sind konstruktiv so ausgeführt, dass ein Gleiten zwischen zwei Kunstharzpressholzlagerflächen stattfindet. Dazu wird das Loslager aus zwei Teilen zusammengesetzt. Ein Kunstharzpressholzblock wird mit dem Tank verklebt und der andere mit der Schiffsstruktur. Zwischen den beiden Kunstharzpressholzblöcken werden zur Reibungsreduktion und als Schutz für die Auflager Metallplatteneinleger genutzt [14]. Diese Ausführung ist in Abbildung 8 dargestellt [20]. Eine Verbindung zwischen den Festlagern und dem Tank wird durch eine Verklebung hergestellt. Dazu wird ein Epoxidharz genutzt, das neben der stoffschlüssigen Verbindung ebenfalls zum Ausgleich von Toleranzen eingesetzt wird. Bei den Festlagern wird der Ausgleich durch eine direkte Verklebung zwischen Tank und Lager realisiert. Bei den Loslagern wird der Ausgleich durch eine Verklebung des Auflagers mit der Schiffsstruktur eingestellt. Die zu erreichenden Abstände werden über zusätzliche Holzeinleger definiert, welche nachträglich wieder entfernt oder mit eingeklebt werden.

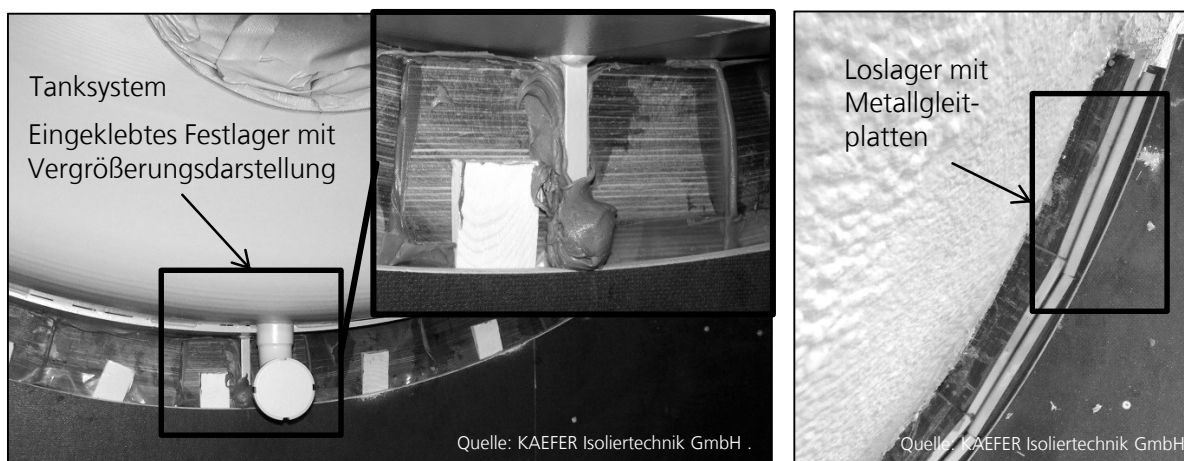


Abbildung 8: Verklebung des Tanks mit Auflagern aus Kunstharzpressholz (li.) und Ausführung des Loslagers mithilfe von zwei Lagerblöcken (re.)

2.2.1 Mechanische Belastungen

Die Auflager in einem Schiff dienen der Abstützung der Tankstrukturen gegen alle auftretenden Verschiebungen durch Bewegungen des Schiffs. Dabei unterscheidet man in die folgenden drei möglichen Belastungs- bzw. Beschleunigungsrichtungen [8]:

- Längsbeschleunigung: a_{xx} - Bewegungsbeschleunigung infolge einer Längs- und Stampfbewegung sowie der Schwerkraftkomponente der Stampfbewegung
- Querbeschleunigung: a_{zz} - Bewegungsbeschleunigung infolge der Quer-, Gier- und Rollbewegung sowie Schwerkraftkomponenten der Rollbewegung
- Vertikalbeschleunigung: a_{yy} - Bewegungsbeschleunigungen infolge der Tauch-, Stampf- und möglicherweise Rollbewegung (senkrecht zum Schiff wirkend)

Ferner entstehen an den Loslagern zusätzliche Reibungsbelastungen durch die beschriebenen Schiffsbewegungen. Grundsätzlich sind die Auflager nach [8] so anzuordnen, dass diese einen maximalen Krängungswinkel des Schiffs von 30° abstützen. Bei runden Tanksystemen werden die Lager ferner in einem Winkel von 120° um den Tank angeordnet. Um die auftretenden Belastungen in den Auflagersystemen zu berechnen, existieren variierende Angaben der zu nutzenden Sicherheitsfaktoren, die wiederum die maximal zulässigen Belastungen bestimmen. Die allgemeingültigen Berechnungsvorschriften für Auflager können dem IGC- [8] und dem ASME-Code [21] entnommen werden. Wird der IGC-Code als Grundlage zur Bestimmung der maximalen Belastungen für die Auflager angenommen, ergeben sich diese wie in Abbildung 9 dargestellt. Allen Berechnungen liegt die Annahme zu Grunde, dass der Schwerpunkt in der Mitte des Tanks liegt. Für den Fall einer frontalen Kollision müssen die Lager einer 0,5fachen Belastung des Tankgewichts standhalten. Für den Fall einer rückwärtsgerichteten Kollision reduziert sich der Wert auf das 0,25fache des Tankgewichts [8]. Nach ASME [21] wird für die Berechnung vertikaler Belastungen (f_{xx} , f_{yy}) ein Zusatzfaktor von 2 genutzt. Ebenfalls muss das System eine dreifache Sicherheit gegenüber der vertikalen, statischen Last des Tanks (f_{yy}) und einer zweifachen Sicherheit gegenüber einem Auftrieb aufweisen (f_{yy})³[22]. Zusätzlich muss das Auflagermaterial nach [22] für einen Einsatz in einem unabhängigen Tanksystem einen materialeitigen Beanspruchungssicherheitsfaktor von 4, bezogen auf seine maximale Beanspruchbarkeit gegenüber äußeren Kräften aufweisen.

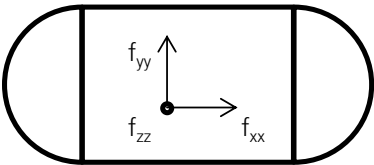
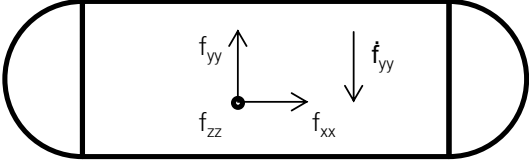
IGC/IMO-Code		Transportation/ ASME-Code	
			
Beanspruchungsrichtung	Maximal zulässige Beanspruchungen	Beanspruchungsrichtung	Maximal zulässige Beanspruchungen
f_{xx}	$0,5 \cdot g \cdot m_t / -0,25 \cdot g \cdot m_t$	f_{xx}	$2 \cdot g \cdot m_t / -2 \cdot g \cdot m_t$
f_{yy}	k.A.	f_{yy}	$2 \cdot g \cdot m_t / -2 \cdot g \cdot m_t$
f_{zz}	k.A.	f_{zz}	k.A.
Anordnung der Lager	120°	f_{yy}	$3 \cdot g_{\text{statisch}} \cdot m_t$
		Sicherheitsfaktor Material	4

Abbildung 9: Lastannahmen nach IGC-Code (li.) [8] und ASME Code (re.) [21] für LNG-Tanks [22]

³ Bei einem Eindringen von Wasser in den Bauraum soll der Tank gegen ein Aufschwimmen gesichert sein. Dies wird durch eine zusätzliche Abstützung des Tanks gegenüber der Decke des Bauraums gewährleistet.

Die aufgeführten Beanspruchungsfälle bilden die Grundlage für die Bestimmung der mechanischen Mindestanforderungen für Materialien, die als Auflagersystem eingesetzt werden sollen. Um diese zu ermitteln bzw. festzustellen, ob ein Material in der Lage ist, diese zu erfüllen, können experimentelle Materialuntersuchungen für eine Werkstoffqualifizierung abgeleitet werden. Die folgenden Untersuchungen zur Ermittlung der entsprechenden Kennwerte sollten durchgeführt werden:

- Statische Kurz- und Langzeitdruckfestigkeit σ_D ,
- Statische Scherfestigkeit τ ,
- Schwingfestigkeit (zur Bildung von zusätzlichen Abminderungsfaktoren)

2.2.2 Thermische und mediale Belastungen

Die Auflager sind auf Grund ihrer Einbausituation starken, externen medialen und thermischen Belastungen ausgesetzt. Dadurch entstehen insbesondere große Temperaturunterschiede in den Lagern, da es an den Auflagerflächen keine zusätzlichen Isolierungen gibt. Somit kommt es zu einem Temperaturunterschied von ≥ 150 K. Weiterhin treten Beanspruchungen durch das Abkühlen/Aufwärmen des Tanks auf. Diese sind eine Folge der thermischen Ausdehnung des Tanks bzw. der angeschlossenen Schiffsstruktur. Die Beanspruchung durch Ausdehnung soll durch die Auflagersysteme aufgenommen werden, ohne dabei Spannungen in den Tank oder die Schiffsstruktur einzuleiten [8]. Die Auf- und Abkühlvorgänge führen zur Bildung von Kondenswasser in den Bereichen zwischen Tank und Lagern. Das Kondenswasser kann in das Auflager eintreten und ein Schwellen des Kunstharzpressholzes verursachen [23]. Darüber hinaus können die niedrigen Temperaturen an den Auflagern zu einer Vereisung der Auflager durch das Kondenswasser führen. Diese Vereisung kann sich während des LNG-Transports durch weiteren Eisaufbau verstärken, da die bereits aufgebaute Eisschicht und die damit sehr niedrige Temperatur des Auflagers zu einer dauerhaften Taupunktunterschreitung führen. Als Folge kann ein starker Eisaufbau an den Lagerstrukturen entstehen, der nach Aussage der Schiffsreeder aber unbedingt zu vermeiden ist, da die Langzeitauswirkungen dieses Eisaufbaus auf die Auflager unbekannt sind. Um diesen Eisaufbau zu verhindern, existieren Überlegungen, Begleitheizungen an den Lagern einzusetzen. Dies hätte den Vorteil der Vermeidung eines Eisaufbaus. Jedoch würde eine erhöhte Wärmeeinbringung in den Tank und damit eine Steigerung der Boil-Off-Rate eintreten. Insbesondere ein Boil-Off soll bei dem Transport von verflüssigtem Erdgas unbedingt vermieden werden, da hierbei eine Verdunstung des verflüssigten Erdgases (Regasifizierung) eintritt. Diese Regasifizierung führt zu einem Ansteigen des Tankinnendrucks. Da jedoch die meisten Tanksysteme auf Schiffen drucklos sind, wird der ansteigende Druck durch ein Ablassen des Gases vermieden. Daraus resultiert dementsprechend ein Verlust der Ladung. Um das regasifizierte LNG nicht vollständig zu verlieren, wird das Gas entweder erneut durch ein energieintensives Abkühlen verflüssigt und dem Tank wieder zugeführt oder aber auch als Treibstoff für das Schiff genutzt. Wenn die technischen Systeme für eine Aufarbeitung oder Nutzung des Boil-Off-Gases nicht vorhanden sind, wird das regasifizierte Gas an die Umgebung abgeführt. Ein Ablassen des Gases an die Umgebung führt zu einem geringeren Füllgrad des Tanks, so dass ein damit einhergehender erhöhter Wärmeeintrag einen erneuten und verstärkten Boil-Off verursacht [5, 24 bis 26].

Aus der Beschreibung der thermischen Belastungen ergibt sich die Notwendigkeit zur Bestimmung der folgenden Parameter, mithilfe derer die Beurteilung einer thermischen Beanspruchbarkeit für ein als Auflager einzusetzendes Material möglich ist:

- Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit
- Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit
- Bestimmung des dauerhaften Kälteeinflusses (Versprödung)
- Untersuchung eines möglichen Wassereintritts in die Lager und Bestimmung des Einflusses von gefrorenem Wasser auf die mechanischen Eigenschaften
- Einfluss starker Temperaturunterschiede zwischen Tank/Umgebung ($\Delta K > 150\text{ °C}$)
- schnelle und große Temperaturschwankungen (Auf- und Abkühlvorgänge)
- Wärmeausdehnung

2.3 Entwicklungsdefizite

Der aufgeführte Stand der Technik zeigt, dass Kunstharzpressholz, als bisher einzig genutzter Werkstoff, für LNG-Auflagersysteme nur eine **befriedigende mediale und thermische Beständigkeit sowie Isolationsleistung** aufweist. Die durch die Nutzung von Kunstharzpressholz vorhandenen Defizite lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Isolationsleistung derzeitiger LNG-Auflager ist nur befriedigend und sollte daher verbessert werden. Der von den Isolationseigenschaften abhängige erhöhte Wärmestrom über die Auflager in den Tank führt zu einem Druckanstieg des Tankinnendrucks. Damit kommt es zu einem durch Wärme verursachten Boil-Off des regasifizierten Gasanteils. Ein Boil-Off führt immer zu einem Ladungsverlust und einer indirekten Steigerung der Transportkosten.
- Die derzeitige Isolationsleistung hat ebenfalls negative Auswirkungen auf die Kunstharzpressholzauflager und die angrenzende Schiffsstruktur. Auf Grund dauerhafter Temperaturen von -163 °C und der Möglichkeit einer Durchkühlung der Auflager kann es zu einer Vereisung dieser sowie der angrenzenden Schiffsstruktur kommen. Eine Versprödung der Stahlschiffsstruktur ist ebenfalls möglich.
- Es sind momentan keine, hinsichtlich ihrer Isolationswirkung verbesserten Kunstharzpresshölzer bekannt. Eine signifikante Verbesserung der Isolationseigenschaften von Kunstharzpresshölzern ist darüber hinaus technisch nur sehr eingeschränkt möglich.
- Ferner sind keine Alternatiwerkstoffe aus einem anderen Material als Kunstharzpressholz für die Lagerung von LNG-Tanksystemen bekannt.
- Bei den Auflagern aus Kunstharzpressholz, kann es zu einem quellungsbedingten Aufplatzen der Lager durch Wassereinschlüsse und Eisbildungen kommen. Dies führt zu einer Reduktion der mechanischen Eigenschaften des Kunstharzpressholzes. Die Konsequenz daraus ist eine ungenügende Tanklagerung.
- Es existieren keine umfassenden Spezifikationen, welche mechanische als auch mediale/thermische Belastungen für Auflagerwerkstoffe unter Berücksichtigung von Regelwerken und Anforderungen aus der Einbausituation definieren.

Auf Grund der Defizite im Bereich der thermischen Isolierung und der bedingten medialen Beständigkeit gibt es bei dem derzeit genutzten Auflagerwerkstoff aus Kunstharzpressholz Weiter- bzw. Neuentwicklungsbedarf. Der zur Behebung dieser Defizite im Rahmen dieser Arbeit verfolgte Konzeptansatz ist im folgenden Kapitel 3 beschrieben.

3 Konzept zur Entwicklung eines Auflagerwerkstoffs

Die theoretischen Überlegungen zu den mechanischen und thermischen Anforderungen bilden die Ausgangsbasis für die Neuentwicklung eines geeigneten Auflagermaterials. Nachfolgend werden noch einmal die Hauptanforderungen an das zu entwickelnde Material dargestellt:

- Auf Grund der Belastungssituation muss der Auflagerwerkstoff in Form mechanischer Festigkeiten (tatsächlich benötigte Festigkeiten sind unbekannt) einen Widerstand gegenüber den Belastungen aufweisen. Die entsprechenden Festigkeiten sind:
 - Druckfestigkeit
 - Scherfestigkeit
 - Ermüdungsfestigkeit
- verbesserte Isolationswirkung mit einer Wärmeleitfähigkeit $< 0,25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ⁴[27]
- Beständigkeit gegenüber tiefen Temperaturen ($-163 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Beständigkeit gegenüber großen Temperaturdifferenzen $\Delta T \geq 150 \text{ K}$

Wie in den Entwicklungsdefiziten beschrieben, weist das Kunstharzpressholz bei einer grundlegenden Eignung als Auflagerwerkstoff dennoch Defizite auf. Diese sind insbesondere in einer befriedigenden Isolationsleistung sowie einer guten bis befriedigenden medialen/thermischen Beständigkeit zu finden. Eine technische Weiterentwicklung bzw. Modifikation des Kunstharzpressholzes ist nicht bekannt, so dass eine Werkstoffneuentwicklung notwendig wird. Die Neuentwicklung soll in Form eines FKV's erfolgen und kann als Arbeitshypothese folgend zusammengefasst werden.

Ein FKV-Werkstoff soll als Auflagermaterial für LNG-Tanksysteme entwickelt werden.

Der FKV-Werkstoff wird durch Füllstoffe in seinen mechanischen und thermischen Eigenschaften modifiziert, so dass dieser die benannten mechanischen Anforderungen erfüllt, die thermischen Isolationseigenschaften verbessert sowie eine mediale/thermische Beständigkeit garantiert.

FKV-Werkstoffe sind als Auflagermaterial vielversprechend, da die Epoxidharzmatrix dieser, mit Hilfe von Fasern und Füllstoffen, hinsichtlich ihrer mechanischen und thermischen Eigenschaften modifiziert werden kann. Weiterhin weisen FKV-Werkstoffe unter kalten Temperaturen hervorragende mechanische Eigenschaften auf [19]. Ebenso sind FKV-Werkstoffe gegen die meisten thermischen und medialen Belastungen, die an einem Auflager auftreten können, beständig. Dieser Ansatz wird momentan ebenfalls durch die Nutzung von modifizierten Epoxidharzen zur Lagerung von Rohrsystemen für Kryoflüssigkeiten entwickelt [18].

Folgend wird in Anlehnung an die VDI 2225 Blatt 3 [28] eine Nutzwertanalyse zur Veranschaulichung und Darstellung der Materialauswahl durchgeführt (vgl. Tabelle 1). Diese soll den Auswahlprozess für die angestrebte Werkstoffneuentwicklung nachvollziehbar darstellen. Neben den sich aus den technischen Gegebenheiten ergebenden Anforderungen an ein Auflager werden auch fertigungstechnische Gesichtspunkte bei der Auswahl der Materialien berücksichtigt. Zu diesen Aspekten zählen:

⁴ Wärmeleitfähigkeit von Kunstharzpressholz nach [27]

- eine reproduzierbare Fertigungsqualität,
- eine endkonturnahe Fertigung zur Reduktion des Nachbearbeitungsaufwands sowie
- eine kostengünstige Fertigung.

Für die Auswahl möglicher Materialien kommen, nach einer Literaturrecherche (vgl. [29 bis 33]), die folgenden in Tabelle 1 aufgeführten Materialien in Frage.

Tabelle 1: Nutzwertanalyse zur Materialauswahl für die Neuentwicklung eines Auflagermaterials

Anforderungen	Wichtung der Eigenschaften	Kunstharz-pressholz	Epoxidharz	Modi-fiziertes Epoxidharz (Festigkeit/Isolierung)	Modi-fiziertes Epoxidharz (Festigkeit)	Modi-fiziertes Epoxidharz (Isolierung)	PUR Hartschaum hohe Dichte [64 kg/m³]	PUR Hartschaum niedrige Dichte [16 kg/m³]	Polystyrol	Pkt.
Mechanische Festigkeit [MPa]	30%	200	100	10	200	10	0,63	0,16	0,12	0
Verbesserte Isolationswirkung mit einer Wärmeleitfähigkeit < 0,25 W/m·K	30%	0,25	0,2	0,18	0,4	0,15	0,03	0,02	0,17	10
Beständigkeit gegenüber tiefen Temperaturen (-163°C)	10%	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	ein- geschränkt	5
Beständigkeit gegenüber großen Temperaturdifferenzen ΔT > 150 K	10%	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	k.A.	10
Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit, chemischen und korrosiven Medien	5%	ein- geschränkt	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	ein- geschränkt	6
reproduzierbare Fertigung	5%	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	ein- geschränkt	ein- geschränkt	ein- geschränkt	5
endkonturnahe Fertigung	5%	ein- geschränkt	Ja	Ja	Ja	Ja	ein- geschränkt	ein- geschränkt	ein- geschränkt	5
kostengünstige Fertigung	5%	ein- geschränkt	ein- geschränkt	ein- geschränkt	ein- geschränkt	ein- geschränkt	Ja	Ja	Ja	9
Gesamtsumme		8,1	8,8	9	6,6	7,5	6,4	6,4	6,4	5,8
Platzierung		3	2	1	5	4	6	6	7	

Eine Bewertung der einzelnen Materialien erfolgt anhand unterschiedlicher Kennwerte aus der Literatur sowie Erfahrungswerten, die durch eigene experimentelle Versuche ermittelt werden. Neben den Alternativmaterialien werden, zur Schaffung einer Referenz, auch die bereits genutzten Kunstharzpresshölzer bewertet. Die Bewertung der einzelnen Materialien erfolgt über die in der VDI Richtlinie 2225 vorgeschlagene Skala für eine Nutzwertanalyse von 0 (absolut unbrauchbar) bis zu 10 (Ideallösung). In Tabelle 1 werden die einzelnen Eigenschaften bewertet, so dass eine Gesamtsumme für jedes Material errechnet werden kann. Diese Gesamtsumme bildet die Grundlage für eine weitere Materialauswahl. Zusätzlich sind die Anforderungen einzeln gewichtet, um die unterschiedliche Bedeutung hervorzuheben. Dabei sind die bereits hergeleiteten Grundanforderungen bezüglich der mechanischen Festigkeit und der reduzierten Wärmeleitfähigkeit mit kumuliert 60 % als entscheidende Kriterien hoch gewichtet. Alle weiteren Eigenschaften sind dabei untergeordnet auf die verbleibenden Anteile von 40 % verteilt. Das Ergebnis der Nutzwertanalyse zeigt, dass die Verwendung eines Epoxidharzes modifiziert mit Isolationsfüllstoffen und verstärkt durch festigkeitssteigernde Fasern als FKV-Werkstoff ein aussichtsreiches Material für die Neuentwicklung eines Auflagerwerkstoffs darstellt. Das Ergebnis bestätigt die zuvor aufgestellte Arbeitshypothese.

Auf die Nutzung von anderen Harzsystemen wie bspw. Vinylester- oder Polyesterharzen wird verzichtet, da die Epoxidharze im Vergleich die besten mechanischen Eigenschaften und das beste Faserbenetzungsverhalten aufzeigen [34]. Daher muss der im Vergleich der Harzsorten ungefähr doppelt so hohe Preis des Epoxidharzes im Vergleich zu den anderen Harzsorten in Kauf genommen werden. Der kostentechnische Vergleich zwischen Epoxidharz und Kunstharzpressholz zeigt ein ungefähr gleiches Ergebnis.

Zur Zielerreichung der aufgestellten Arbeitshypothese und unter Einbeziehung der Ergebnisse aus der Nutzwertanalyse wird ein Konzept entwickelt, das verschiedene Schritte zur Entwicklung eines Auflagerwerkstoffs vorsieht (vgl. Abbildung 10). Die Entwicklungsschritte sind:

- theoretische Überlegungen,
- experimentelle Untersuchungen,
- Berechnung und Auswahl sowie
- Ergebnistransfer.

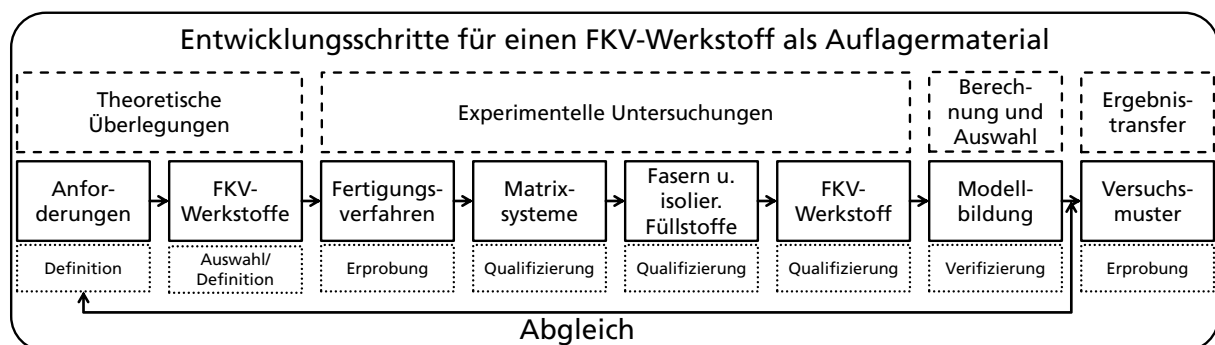


Abbildung 10: Entwicklungsschritte für einen FKV-Werkstoff als Auflagermaterial

Die jeweiligen Unterpunkte der Entwicklungsschritte bilden die zu bearbeitenden Schwerpunkte der Arbeit und beinhalten die folgenden Lösungsschritte.

I. Definition von Anforderungen

Beginnend sollen beispielhaft an zwei LNG-Tanksystemen charakteristische mechanische und thermische Belastungen für Auflagerwerkstoffe ermittelt werden. Diese Belastungen beschreiben exemplarisch die zu erreichenden Ziele und Anforderungen für einen FKV-Werkstoff.

II. Auswahl und Definition aller relevanten Komponenten für die Entwicklung eines FKV-Werkstoffs

Es sollen alle Betrachtungen zur Entwicklung eines FKV-Werkstoffs dargestellt werden. Dazu gehören insbesondere die Auswahl von Fertigungsverfahren sowie Einzelkomponenten des Werkstoffs. Ferner sollen geeignete Versuche zur Qualifizierung des Werkstoffs ausgewählt werden.

III. Erprobung von Fertigungsverfahren

Der experimentelle Teil der Arbeit beginnt mit der Erprobung von Fertigungsverfahren. Den Fertigungsverfahren kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Es muss eine reproduzierbare Fertigung von Werkstoffen, die mit Füllstoffen modifiziert sind, gewährleistet werden, da der Werkstoff ansonsten nicht in der Lage ist, die Anforderungen, die aus der Belastung der Auflager definiert sind, zu erfüllen. Darüber hinaus muss das Fertigungsverfahren die Fertigung von Probekörpern mit einer gleichbleibenden guten Qualität gewährleisten können.

IV. Qualifizierung eines Matrixsystems

Das zu nutzende Matrixsystem soll in experimentellen Untersuchungen erprobt werden, um eine Eignung für den Anwendungsfall festzustellen. Ferner sollen durch experimentelle Versuche die benötigten und fehlenden Kennwerte für das Matrixsystem komplettiert werden. Diese helfen einen umfassenden Wissensstand für eine Nutzung in einem FKV-Werkstoff aufzubauen.

V. Qualifizierung von festigkeitssteigernden Fasern und isolierenden Füllstoffen

Die für die Nutzung in einem FKV-Werkstoff ausgewählten Füllstoffe sollen in experimentellen Untersuchungen hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften qualifiziert werden. Mithilfe dieser Versuche soll der Einfluss der Füllstoffe auf die mechanischen Eigenschaften des Matrixsystems sowie Kennwerte für die analytische Berechnung generiert werden.

VI. Qualifizierung eines FKV-Werkstoffs

Die experimentelle Qualifizierung des FKV-Werkstoffs soll die Ermittlung von bisher unbekannten Kennwerten für einen FKV-Werkstoff, der mit festigkeitssteigernden und isolierenden Füllstoffen modifiziert ist, ermöglichen. Diese sollen für einen Abgleich zwischen den Anforderungen an einen Auflagerwerkstoff, die aus der Belastungssituation resultieren, und den Kennwerten des FKV-Werkstoffs, welche sich aus der Materialbeanspruchung ergeben, genutzt werden. Darüber hinaus sollen die Untersuchungen dazu beitragen, allgemeine Erkenntnisse über den FKV-Werkstoff zu ermitteln.

VII. **Verifizierung** analytischer **Modelle** mit experimentellen Untersuchungen

Es soll die Eignung der Anwendung einfacher, analytischer Berechnungsverfahren zur Bestimmung von mechanischen Festigkeits- und Wärmeleitfähigkeiten bei dem hier zu entwickelnden FKV-Werkstoff ermittelt werden. Dazu werden einfache analytische Verfahren zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften, als auch zur Bestimmung der thermischen Isolationseigenschaften aus der Literatur genutzt. Diese ermöglichen eine quantitative Variation der Füllstoffe und eine sich daraus ergebende qualitative Änderung der Werkstoffeigenschaften. Als Vergleich zu den Berechnungsergebnissen werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen genutzt. Ziel soll sein, variierende Füllstoffanteile und deren Auswirkungen auf die Festigkeits- und Isolationseigenschaften des FKV-Werkstoffs zu ermitteln, um bei zukünftigen Materialmodifikationen aufwendige experimentelle Versuchsreihen zu vermeiden. Ferner soll mit Hilfe der Berechnungen die Definition einer verbesserten Materialzusammensetzung des FKV-Werkstoffs, welche die ermittelten Beanspruchungen am besten erträgt, vorgenommen werden.

VIII. **Abgleich** der **Ergebnisse** mit den definierten **Anforderungen**

Die optimierte Werkstoffzusammensetzung soll mit den exemplarisch definierten Anforderungen aus den Berechnungsbeispielen und den experimentell ermittelten Ergebnissen verglichen werden. Dieser Vergleich soll Aufschluss über die Eignung der optimierten FKV-Werkstoffzusammensetzung für die exemplarische Anwendung als Auflagerwerkstoff geben.

IX. **Erprobung** der Erkenntnisse durch die **Fertigung eines Versuchsmusters**

Die optimierte Werkstoffzusammensetzung soll abschließend als Auflager-Versuchsmuster unter Laborbedingungen gefertigt werden. Ziel ist die Ermittlung von fertigungs- und prozesstechnischen Erkenntnissen bei der Fertigung von Auflagern im Maßstab 1:1. Als Basis aus einem Versuchsmusteraufbau mit einem auf Kunstharpzpresshölzern gelagertem Test-Tank soll das dabei bereits verbaute Auflager aus Kunstharpzpressholz dienen.

Die beschriebenen Entwicklungsschritte werden nacheinander durchlaufen, um **Erkenntnisse über das Verhalten des FKV-Werkstoffs zu gewinnen**. Alle wesentlichen Erkenntnisse werden am Ende jedes Kapitels und zu jedem Entwicklungsschritt zusammengefasst. Während der Entwicklung werden einzelne Verfahren, Materialien und Prozesse ausgeschlossen, um eine **FKV-Werkstoff-Vorzugsvariante zu ermitteln**. Einige Ergebnisse ausgeschlossener Komponenten werden in [35, 36] dargelegt und können als erweiterte zusätzliche Grundlagenbearbeitung für diese Arbeit betrachtet werden.

4 Definition von Anforderungen an Auflagerwerkstoffe

Das folgende Kapitel soll alle mechanischen und thermischen Belastungen, die bei Auflagern auftreten, an zwei praktischen Beispielen beschreiben. Diese Belastungen stellen die zu erfüllenden Anforderungen für einen alternativen Auflagerwerkstoff aus einem FKV dar.

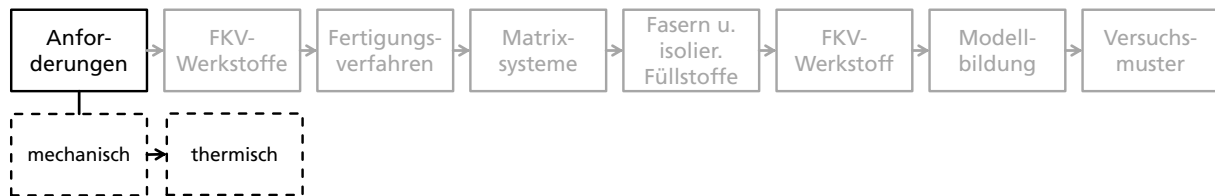


Abbildung 11: Belastungen der Auflagerwerkstoffe

4.1 Mechanische Belastungen der Auflagersysteme an praktischen Beispielen

Die Entwicklung eines Werkstoffs für einen konkreten Anwendungsfall bedarf im ersten Schritt einer Analyse der auftretenden äußeren Belastungen. Dazu werden im Rahmen dieser Untersuchungen zwei unabhängige Tanksysteme hinsichtlich ihrer mechanischen Belastungen betrachtet. Diese Tanksysteme sind für unabhängige Tanksysteme repräsentativ und werden zumeist in der Praxis genutzt.

Zum einen wird ein prismatischer Tank (Typ-B), zum anderen ein zylindrischer Drucktank (Typ-C) untersucht. Alle Betrachtungen dienen einer Ermittlung der auftretenden Belastungen an den Tanklagern und gleichzeitig einer Ermittlung der zu erfüllenden Beanspruchbarkeit des zu entwickelnden FKV-Werkstoffs. Die Daten dieser Tanks werden dabei von Unternehmen aus dem Schiffbau bereitgestellt und teilweise zur Vereinheitlichung modifiziert. Ebenfalls werden Annahmen getroffen, um die lückenhafte Datenlage für theoretische Überlegungen und überschlägige Kalkulationen zu vervollständigen.

4.1.1 Prismatischer Tank Typ-B

Der prismatische Tank Typ-B hat die folgenden in Abbildung 12 dargestellten geometrischen Abmaße. Das Gesamtgewicht entspricht der Eigenmasse des Tanks (ca. 2.900 t) sowie einem LNG-Füllgrad von 98 %. Bei einer Dichte von LNG mit 450 kg/m^3 [37] ergibt sich demnach ein aus Tankmasse und Füllung kombiniertes, statisch vertikal auf die Auflager wirkendes Gewicht von 24.500 t. Die Anordnung der Fest- und Loslager unter dem Tank ist in Abbildung 13 schematisch dargestellt. Die gewählte Darstellung ist nur exemplarisch und die dargestellte Anzahl an Auflagerblöcken ist aus Darstellungsgründen nicht mit den geometrischen Annahmen übereinstimmend. Die Lageranordnung sieht vor, dass die Festlager in der Mitte in Längs- und Querrichtung angeordnet sind, so dass sich der Tank während der Auf- und Abkühlprozesse frei nach außen ausdehnen und zusammenziehen kann. Weiterhin haben die Festlager in der Mitte die Aufgabe auftretende Quer- und Längskräfte über die Schwertaufnahme abzutragen, um den Tank gegenüber den Schiffsbewegungen abzustützen.

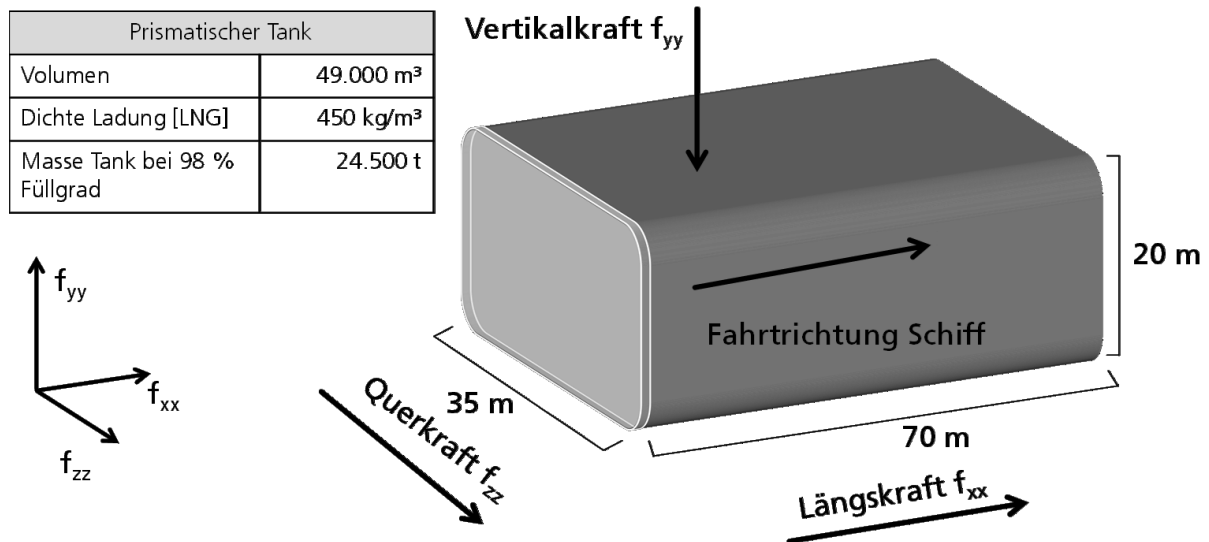


Abbildung 12: Geometrische Abmaße des schematischen Tanks Typ-B

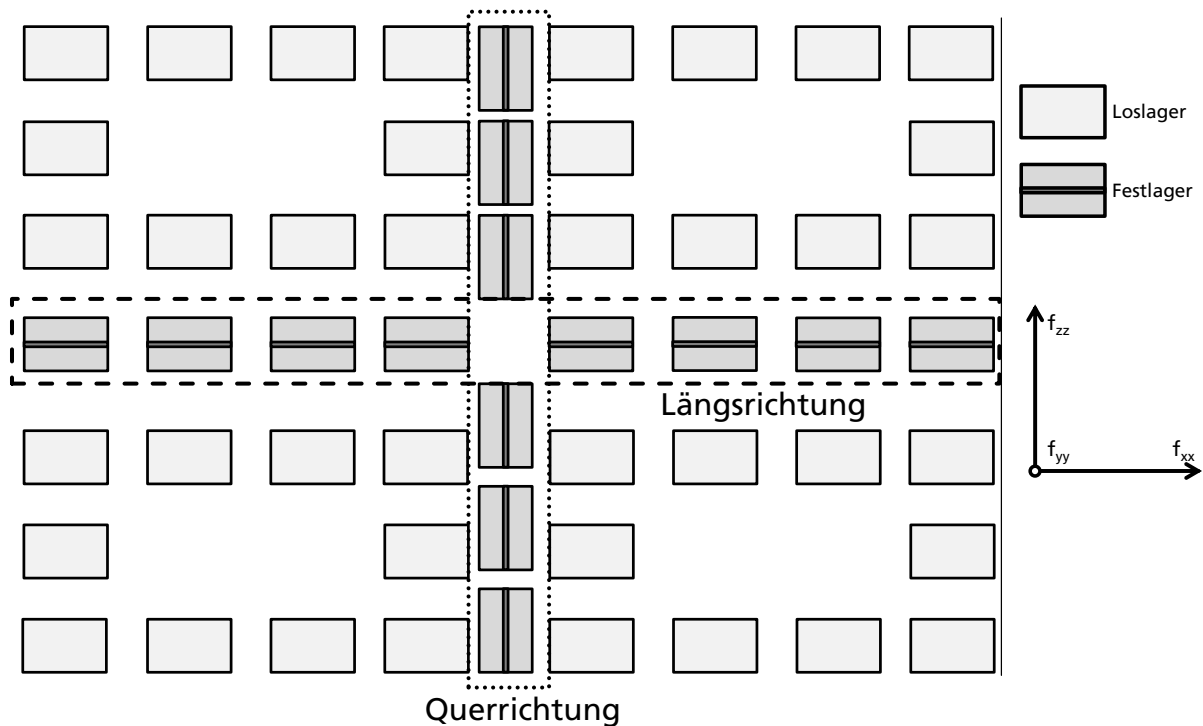


Abbildung 13: Schematische Anordnung der Fest- und Loslager unter dem Tanksystem

Nachfolgend sollen die an den Auflagern entstehenden Kräfte für dieses Tankbeispiel berechnet werden. Zur Berechnung der anliegenden Kräfte wird eine Vereinfachung des Massenschwerpunkts angenommen und dieser in die Mitte des Tanks gelegt. Es werden die Lasten nach dem IGC-Code bestimmt, da dieser vorrangig bei der Auslegung von Tanklasten in der Praxis genutzt wird. Zusätzlich werden aus der Praxis übernommene Zuschlagsfaktoren mit den IGC-Vorschriften kombiniert. Für die vertikale Belastung in $-f_{yy}$ Richtung kann vereinfacht die Last des Tanks im gefüllten Zustand angenommen werden. Die Berechnungen dienen der einfachen Bestimmung von mechanischen Belastungen, die auf die Auflager durch den Tank und die Schiffsbewegungen wirken. Diese Rechnungen ersetzen nicht eine detaillierte Auslegungsanalyse. Daraus ergibt sich eine entsprechende Vertikalkraft (vgl. Formel 1).

Formel 1: Vertikalkraft auf die Auflager durch den Tank

$$-f_{yy} = 9,81 \frac{m}{s^2} * 24.500.000 \text{ kg} = \mathbf{240.345 \text{ kN}}$$

Neben dem statischen Gewicht wird auch eine Beschleunigung durch Wellengang auf den Tank berücksichtigt. In der Praxis wird dazu ein Zuschlagsfaktor in Höhe von 1,425 genutzt und bereitgestellt (vgl. Formel 2) [38]. Daraus ergibt sich eine in vertikale Richtung wirkende Kraft $-f_{yy}$ von:

Formel 2: Vertikalkrafteinwirkung des Tanks auf die Auflager unter Beachtung von Stampfbewegungen durch Wellengang

$$\begin{aligned} -f_{yy} &= 1,425 * g * m_t \\ -f_{yy} &= 1,425 * 9,81 \frac{m}{s^2} * 24.500.000 \text{ kg} = \mathbf{342.491 \text{ kN}} \end{aligned}$$

Aus dem IGC-Code sind die anliegenden Faktoren für die Lasten in (f_{xx}) und entgegen ($-f_{xx}$) der Fahrtrichtung angegeben [8]. Daraus ergeben sich die folgenden Lasten (vgl. Formel 3). Bei dieser Belastungsrichtung wird in der Praxis nur mit einem Wert von 0,129 gerechnet. Da dieser Wert unter dem aus der Norm vorgeschlagenen liegt, wird an dieser Stelle der kritischere Fall aus dem IGC-Code mit 0,5 in Fahrtrichtung und mit -0,25 entgegen der Fahrtrichtung angenommen.

Formel 3: Längskrafteinwirkung durch den Tank auf die Auflager

$$\begin{aligned} f_{xx} &= 0,5 * g * m_t \\ f_{xx} &= 0,5 * 9,81 \frac{m}{s^2} * 24.500.000 \text{ kg} = \mathbf{120.172,5 \text{ kN}} \\ -f_{xx} &= -0,25 * 9,81 \frac{m}{s^2} * 24.500.000 \text{ kg} = \mathbf{-60.086,25 \text{ kN}} \end{aligned}$$

Eine weitere Beanspruchung der Auflagerlager wirkt in Querrichtung zum Schiff. Hier werden nach dem IGC-Code keine Angaben gemacht, jedoch wird in der Praxis ein Zuschlagswert von 0,777 verwendet [38]. Demnach ergeben sich wirkende Querkkräfte von:

Formel 4: Querkrafteinwirkung durch den Tank auf die Auflager

$$\begin{aligned} f_{zz} &= 0,777 * g * m_t \\ f_{zz} &= 0,777 * 9,81 \frac{m}{s^2} * 24.500.000 \text{ kg} = \mathbf{186.748 \text{ kN}} \end{aligned}$$

Nachdem die auf die Auflager wirkenden Belastungen in drei Richtungen bekannt sind, müssen zur Spannungsberechnung weitere Annahmen getroffen werden.

Es müssen zunächst die Druck- und Scherspannungen entsprechend der in Abbildung 14 dargestellten Flächen bestimmt werden. Diese stellen, wie bereits beschrieben, für den Auflagerblock die Hauptbelastungen dar. Vereinfachend wird eine konstante Spannungsverteilung über die Auflager angenommen.

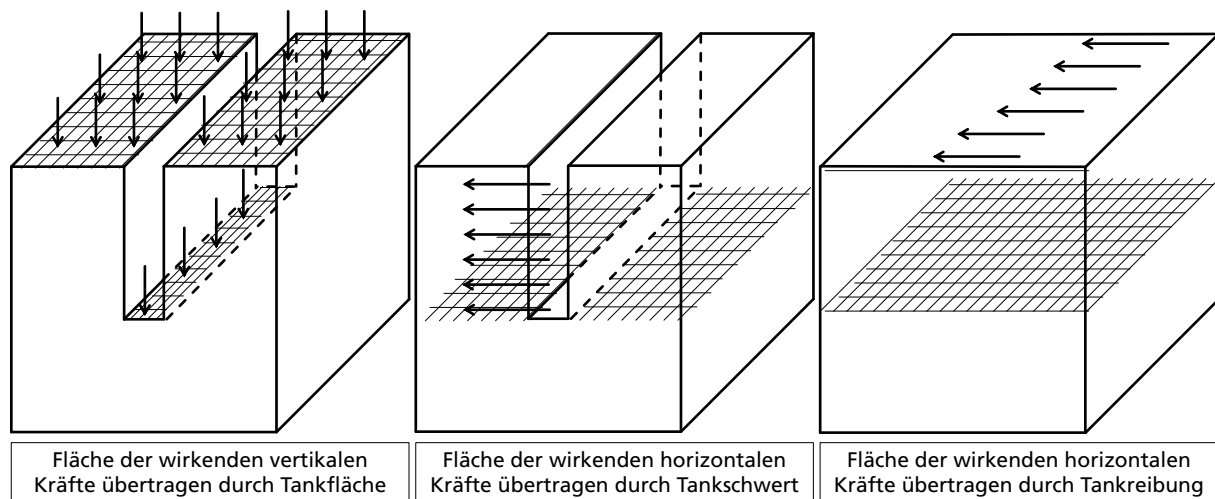


Abbildung 14: Druck- (li.) und scherkraftübertragende (mi.; re.) Flächen

Ferner müssen die Auflagerfläche sowie die geometrischen Abmaße der Lager bekannt sein. Zudem muss eine Einteilung der Lager in Fest- und Loslager vorgenommen werden. In Tabelle 2 sind die für dieses Beispiel getroffenen Annahmen definiert.

Tabelle 2: Zusammenfassende Annahmen für die Berechnung von Spannungen in Auflagersystemen für einen Tank Typ-B

Belastungsflächen	Größe der Fläche
Gesamte Auflagerfläche aus Fest- und Loslagern	82,5 m ²
Auflagerfläche pro Stück vertikal Fest- und Loslager mit 0,5 m * 0,5 m	0,25 m ²
Scherkraftübertragene Fläche bei den Festlagern mit 0,2 m*0,5 m	0,1 m ²
Gesamtanzahl Auflager davon Loslager davon Festlager	330 Stk. mit 82,5 m ² 120 Stk. mit 30 m ² 210 Stk. mit 52,5 m ²
Fläche Festlager zur Sicherung des Tanks in Fahrtrichtung (70 Auflagerblöcke ohne Zwischenabstand entsprechend der Auflagergeometrie Abbildung 15)	7 m ²
Fläche Festlager zur Sicherung des Tanks in Querrichtung (140 Auflagerblöcke ohne Zwischenabstand entsprechend der Auflagergeometrie Abbildung 15)	14 m ²

Die Fläche der Festlager in Längs- und Querrichtung ist abhängig von deren Anordnung sowie der geometrischen Gestaltung der Festlager. Für das hier angenommene Tankbeispiel resultiert aus der Anordnung von 330 Auflagerblöcken eine Gesamtlagerfläche unter dem Tank von 82,5 m². Die für die Auflagerblöcke angenommenen geometrischen Abmaße werden in Abbildung 15 dargestellt. Das Fest- und das Loslager haben die gleichen geometrischen Außenmaße von 500 mm.

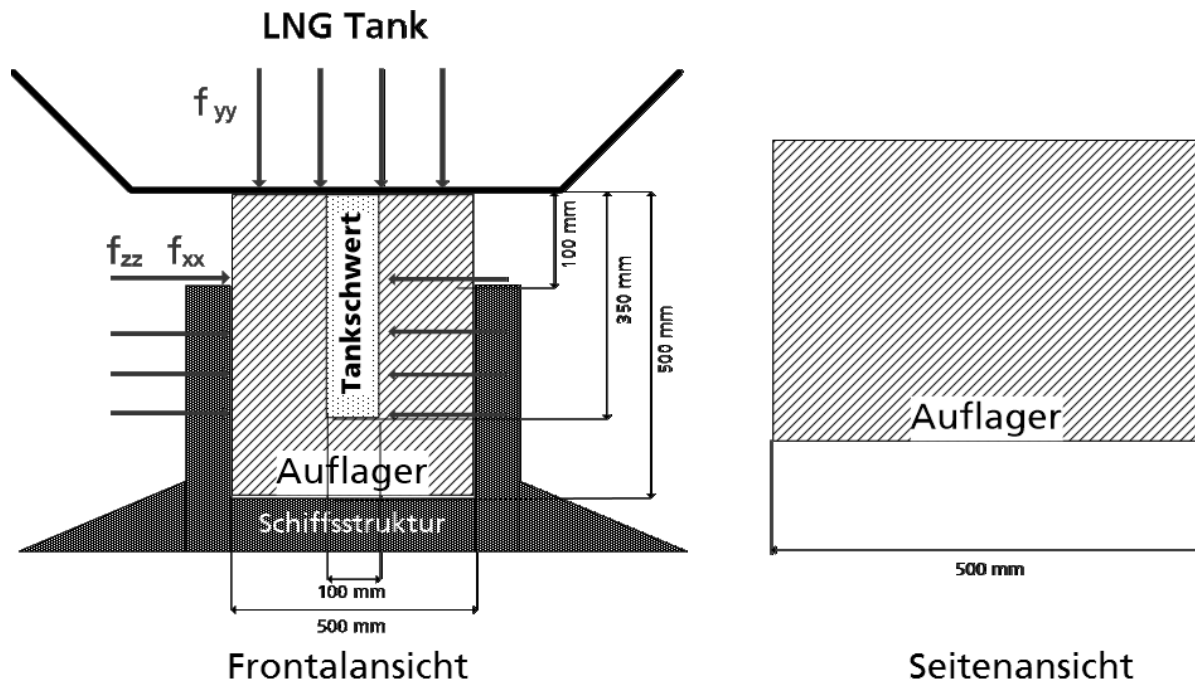


Abbildung 15: Geometrische Abmaße der Festlager

Wie in Abbildung 15 dargestellt, ergibt sich für jedes Auflager eine druckkraftübertragende Auflagerfläche von $0,25 \text{ m}^2$ für eine vertikale Krafrichtung. In den Festlagern entsteht für eine horizontale Krafrichtung eine scherkraftübertragende Fläche von $0,1 \text{ m}^2$.

Folgend werden die Drucknormal- und Scherspannungen berechnet. Für die auftretenden Drucknormalspannungen σ_D der Auflager in vertikaler Richtung ergibt sich ein Wert von $4,2 \text{ MPa}$ (vgl. Formel 5).

Formel 5: Vertikale Spannungen im Auflager

$$\sigma_D = \frac{-f_{yy}}{A_{\text{Auflager}}}$$

$$\sigma_D \approx 4,2 \text{ MPa}$$

Für die Flächen zur Berechnung der Scherspannung von 7 m^2 und 14 m^2 im Festlager ergeben sich Spannungen in Längsrichtung (f_{xx}) mit $\tau_{SL} = 17,2 \text{ MPa}$ und in Querrichtung (f_{zz}) $\tau_{SQ} = 13,3 \text{ MPa}$ (vgl. Formel 6).

Formel 6: Scherspannungen der Auflager in Quer- und Längsrichtung

$$\tau = \frac{f_{xx/zz}}{A_{\text{Auflager Längs-/Querrichtung}}}$$

$$\tau_{SL} = 17,2 \text{ MPa}$$

$$\tau_{SQ} = 13,3 \text{ MPa}$$

Da der IGC-Code keine Angaben über Sicherheitsfaktoren für Materialkennwerte macht, wird der Materialsicherheitsfaktor von 4 aus dem ASME Code übernommen. Dieser Sicherheitsfaktor dient dem Ausgleich sämtlicher Materialfehler und fertigungsbedingten Toleranzen (bspw.

Ausgleich von Höhentoleranzen der einzelnen Auflagerblöcke untereinander in einer Einbausituation in einem Schiff). Dieser Sicherheitsfaktor wird auch in der Auslegung von Auflagern in der Praxis genutzt. Unter Beachtung des Sicherheitsfaktors kann bei einem prismatischen Tank Typ-B an den Auflagern eine benötigte Druckfestigkeit von $\sigma_D = 16,8 \text{ MPa}$ in vertikaler Richtung bestimmt werden. Für die maximalen Scherkräfte in Längsrichtung ergibt sich durch die Nutzung dieses Sicherheitsfaktors ein Wert von $\tau_{SL} = 68,8 \text{ MPa}$. Alle ermittelten Ergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt. Die wesentlichen Anforderungen sind die Spannungen aus der Vertikal- und der Längskraft in Fahrtrichtung.

Tabelle 3: Übersicht der auftretenden Kräfte an und resultierende Spannungen in den Auflagern beim Tank Typ-B

Kraftrichtung	Resultierende Kraft	Fläche	Spannung im Auflager	Spannungen ohne Sicherheitsfaktor	Spannungen mit Sicherheitsfaktor 4
Vertikalkraft $-f_{yy}$	342.491 kN	82,5 m ²	σ_D	4,2 MPa	16,8 MPa
Längskraft positiv f_{xx}	120.172 kN	7 m ²	τ_{SL}	17,2 MPa	68,8 MPa
Längskraft negativ $-f_{xx}$	-60.086 kN	7 m ²	$-\tau_{SL}$	-8,6 MPa	34,4 MPa
Querkraft f_{zz}	186.748 kN	14 m ²	τ_{SQ}	13,3 MPa	53,2 MPa

Der dritte Belastungsfall in Form von Reibungseinflüssen im Loslager kann vernachlässigt werden. Die beim Gleiten entstehende Reibung wird zumeist durch die Nutzung von Metallplatteneinlegern zwischen dem Tank und dem Lager reduziert ($\mu_0 = 0,1$ geschmiert und $\mu_0 = 0,4 \dots 0,7$ trocken [39]). Dennoch kann für die Berechnung von Lasten die Reibung bei überschlägigen Lastberechnungen vernachlässigt werden, da die auftretenden Reibungskräfte sehr viel geringer sind als die auftretenden Scherkräfte, welche durch das Tankgewicht in der Schwertaufnahme verursacht werden. Daher sind die Reibungskräfte hier nicht als zusätzliches oder ausschließendes Anforderungskriterium definiert.

4.1.2 Zylindrischer Tank Typ-C

Die am zylindrischen Tank Typ-C auftretenden Belastungen sind in Abbildung 16 dargestellt.

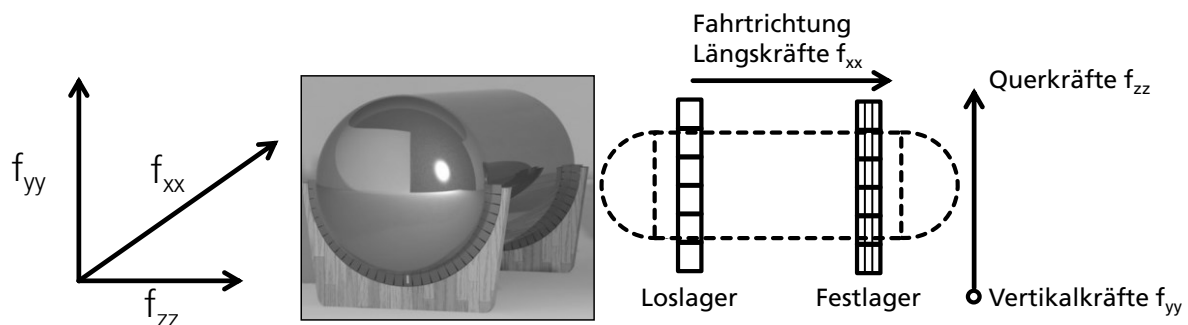


Abbildung 16: Schematische Darstellung des zylindrischen Tanks Typ-C

Die geometrischen Abmaße des Tanks sowie die Anordnung der Auflager sind folgend in Abbildung 17 dargestellt.

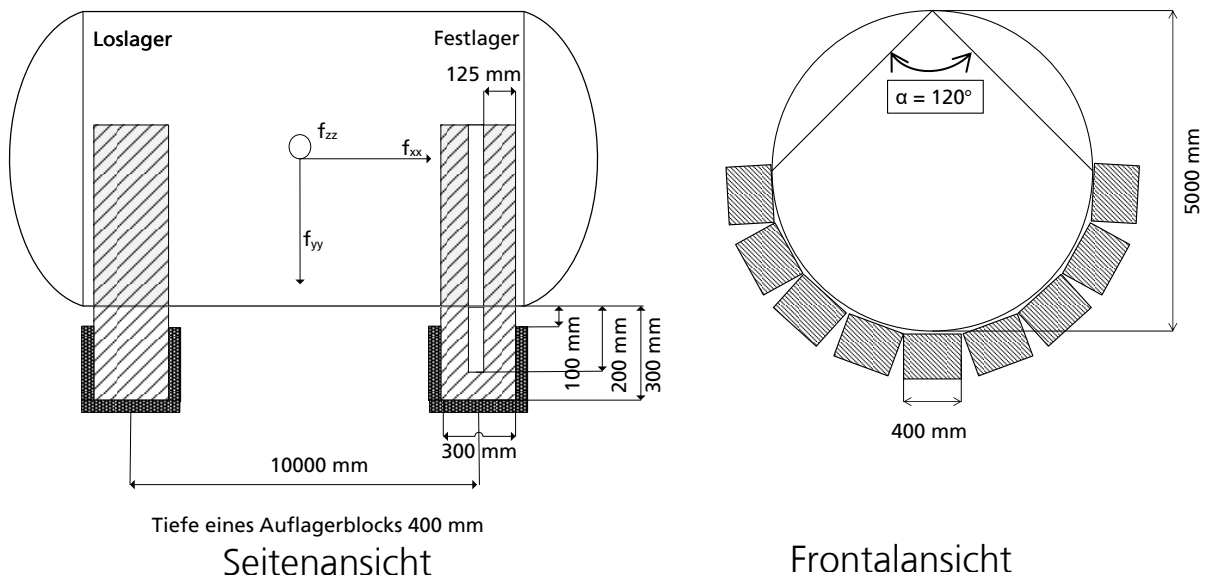


Abbildung 17: Schematische Darstellung der geometrischen Abmaße des Tanks Typ-C

Alle für den Tank getroffenen Annahmen sind zusammengefasst in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Zusammenfassende Annahmen für die Berechnung von Spannungen in Auflagersystemen für einen Tank Typ-C

Belastungsflächen	Größe der Fläche
Gesamte Auflagerfläche aus Fest- und Loslagern	3,14 m ²
Auflagerfläche pro Stück vertikal Fest- und Loslager mit 0,4 m * 0,3 m	0,12 m ²
Scherkraftübertragene Fläche bei einem Festlager	0,05 m ²
Gesamtanzahl Auflager davon Loslager davon Festlager	26 Stk. mit 3,14 m ² 13 Stk. mit 1,57 m ² 13 Stk. mit 1,57 m ²
Fläche Festlager zur Sicherung des Tanks in Fahrtrichtung (13 Auflagerblöcke mit Radien bedingten Zwischenabständen entsprechend der Auflagergeometrie in Abbildung 17)	0,65 m ²

Das Volumen des Tanks beträgt ca. 200.000 l. Daraus folgt eine statisch wirkende Last, bei einem Füllgrad von 98 % und einem Tankeigengewicht von 6,8 t, von ca. 95 t, die auf die Auflager wirkt. Nach Formel 7 ergibt sich damit eine vertikal wirkende Kraft $-f_{yy}$ mit 1.328 kN.

Formel 7: Vertikalkrafteinwirkung auf die Auflager durch den Tank unter Beachtung von Stampfbewegungen durch Wellengang

$$-f_{yy} = 1,425 * g * m_t$$

$$-f_{yy} = 1,425 * 9,81 \frac{m}{s^2} * 95.000 \text{ kg} = \mathbf{1.328 \text{ kN}}$$

In Längsrichtung ergibt sich nach Formel 8 eine Kraft von f_{xx} mit 724,1 kN und $-f_{xx}$ von 362 kN.

Formel 8: Längskrafteinwirkung durch den Tank auf die Auflager

$$f_{xx} = 0,5 * g * m_t$$

$$f_{xx} = 0,5 * 9,81 \frac{m}{s^2} * 95.000 \text{ kg} = \mathbf{466 \text{ kN}}$$

$$-f_{xx} = -0,25 * 9,81 \frac{m}{s^2} * 95.000 \text{ kg} = \mathbf{-233 \text{ kN}}$$

Die auftretenden Querkkräfte ergeben sich bei diesem Tankmodell mit $f_{zz} = 724 \text{ kN}$, dargestellt in Formel 9.

Formel 9: Querkrafteinwirkung durch den Tank auf die Auflager

$$f_{zz} = 0,777 * g * m_t$$

$$f_{zz} = 0,777 * 9,81 \frac{m}{s^2} * 95.000 \text{ kg} = \mathbf{724 \text{ kN}}$$

Folgend werden erneut die aus den Kräften resultierenden Spannungen in den Auflagerblöcken berechnet. Die als Auflagerfläche dienende Fläche wird hierbei über die Formel für die Bestimmung der Kreisbogenlänge (b) berechnet. Daraus ergibt sich eine Auflagerlänge in einem Winkel von 120° mit 5.235 mm (vgl. Formel 10). Ein in der Praxis auftretender Schrumpf und die damit einhergehende Reduktion der Auflagerfläche wird bei dieser Rechnung vernachlässigt.

Formel 10: Berechnung der Kreisbogenlänge

$$b = \frac{\pi * r}{180^\circ} * \alpha = \frac{\pi * 2.500 \text{ mm}}{180^\circ} * 120^\circ = 5.235 \text{ mm}$$

b: Kreisbogenlänge
 α : Anordnung der Auflager unter dem Tank

Die, die Vertikalkraft abtragende Fläche, wird für alle Auflager (Fest- und Loslager) mithilfe des Kreisbogens und der Auflagerbreite von 300 mm berechnet. Für die Fest- und Loslager ergibt sich eine Fläche von jeweils 1,57 m².

Folgend werden die resultierenden Drucknormal- und Scherspannungen berechnet. Zur Bestimmung der vertikalen Drucknormalspannung kann die Formel 11 mit den hier ermittelten Werten genutzt werden. Das Ergebnis ist eine Spannung von 0,42 MPa für schwingende Belastungen. Unter der Annahme eines Sicherheitsfaktors von 4 wird eine zu ertragende Mindestdrucknormalspannung von $\sigma_D = \mathbf{1,7 \text{ MPa}}$ bestimmt.

Formel 11: Vertikale Drucknormalspannungen im Auflager

$$\sigma_D = \frac{-f_{yy}}{A_{\text{Auflager}}}$$

$$\sigma_D \approx 0,42 \text{ MPa}$$

Die Scherspannung der Auflager errechnet sich entsprechend Formel 12. Bei einer Auflagerkonstruktion mit im Kreisbogen angeordneten Auflagerblöcken, ergeben sich ausschließlich Scherkräfte in Längsrichtung f_{xx} . Die Auflagerfläche bestimmt sich aus dem Kreisquerschnitt multipliziert mit der Hälfte der Auflagerbreite, jedoch abzüglich der halben

Schwertbreite. Die entstehende Fläche ergibt sich aus der Auflagerlänge mit 400 mm und der Breite von 125 mm. Die Gesamtfläche über den Kreisbogen für die Scherspannungsberechnung für 13 Auflagerblöcke misst 0,65 m². Die daraus berechnete Scherspannung beträgt 0,71 MPa vgl. Formel 12.

Formel 12: Scherspannungen der Auflager in Quer- und Längsrichtung

$$\tau_{SL} = \frac{f_{xx}}{A_{\text{Auflager Längsrichtung}}}$$

$$\tau_{SL} = 0,71 \text{ MPa}$$

Unter Einbeziehung des Materialsicherheitsfaktors von 4 ergibt sich eine Scherspannung von $\tau_{SL} = 2,86 \text{ MPa}$.

Tabelle 5: Übersicht der auftretenden Kräfte an und resultierende Spannungen in den Auflagern beim Tank Typ-B

Kraftrichtung	Resultierende Kraft	Fläche	Spannung im Auflager	Spannungen ohne Sicherheitsfaktor	Spannungen mit Sicherheitsfaktor 4
Vertikalkraft -f _{yy}	1328 kN	3,14 m ²	σ_D	0,42 MPa	1,7 MPa
Längskraft positiv f _{xx}	466 kN	0,65 m ²	τ_{SL}	0,71 MPa	2,86 MPa
Längskraft negativ -f _{xx}	-233 kN	0,65 m ²	τ_{SL}	-0,35 MPa	-1,43 MPa
Querkraft f _{zz}	724 kN	-	τ_{SQ}	-	-

Die abgeleiteten und zu erfüllenden mechanischen Anforderungen, aus den Berechnungen zum prismatischen und zum zylindrischen Tank, sind nachfolgend noch einmal in Tabelle 6 zusammengefasst. Aus den hier ermittelten Werten ergeben sich die mechanischen Mindestanforderungen für eine Druck- und Scherbelastung, die für die Entwicklung eines Auflagersystems aus einem FKV-Werkstoff benötigt werden.

Tabelle 6: Mechanische Mindestanforderungen an Auflagerwerkstoffe

			Prismatischer Tank Typ-B	Zylindrischer Tank Typ-C
Druckfestigkeit	σ_D	MPa	16,8	1,7
Scherfestigkeit	τ_{SL}	MPa	68,8	2,86

4.2 Thermische Belastungen der Auflager an praktischen Beispielen

Neben dem mechanischen Lastabtrag haben die Auflager zudem die Aufgabe eines thermischen Isolators. Dazu müssen die Lager so ausgeführt sein, dass der Wärmestrom (\dot{Q}) durch die Lagermaterialien hindurch gering gehalten wird. Die hier zur Berechnung genutzten Formeln sind grundsätzlich nur als überschlagene Berechnungen zu verstehen und bilden nicht die exakten Verhältnisse des Wärmeübergangs am Tank wieder. Dazu müssen weiterführende Berechnungen mit Hilfe der Finiten Elemente durchgeführt werden. Nachfolgend sind die im Rahmen dieser Arbeit genutzten theoretischen Grundlagen und Annahmen dargelegt.

Ein Wärmeübergang entsteht immer dann, wenn ein Temperaturgefälle zwischen zwei miteinander verbundenen Systemen besteht. Dabei entsteht ein Wärmestrom zwischen dem System mit höherer Wärme zu dem System mit niedrigerer Wärme, bis ein Gleichgewichtszustand zwischen beiden Systemen eintritt. Der Wärmestrom ist direkt proportional:

- zur Fläche A , die die beiden Systeme verbindet,
- zur Wirkzeit t_w sowie
- zum Temperaturgefälle zwischen den beiden Systemen $\Delta\vartheta$.

Die Wanddicke δ ist bei der Bestimmung des Wärmestroms hingegen umgekehrt proportional. Da der Wärmestrom im Allgemeinen von Temperaturen und bei Gasen zudem von Drücken abhängt, wird die zusätzliche Größe des stoffabhängigen Wärmeleitfähigkeitswertes λ eingeführt. Aus diesen Faktoren ergibt sich die Formel für den Wärmestrom (vgl. Formel 13) [40 bis 43]. Zum Vergleich verschiedener Stoffe hinsichtlich ihrer Eigenschaft Wärme zu leiten bzw. als Isolator zu dienen, wird Formel 13 nach λ umgestellt (vgl. Formel 14).

Formel 13: Bestimmung des Wärmestroms [W]

$$\dot{Q} = A * \Delta\vartheta * \frac{\lambda}{\delta}$$

\dot{Q} :	Wärmestrom
A :	Fläche der beiden verbundenen Systeme
$\Delta\vartheta$:	Temperaturgefälle
λ :	Wärmeleitfähigkeit
δ :	Wanddicke

Formel 14: Formel zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]

$$\lambda = \frac{\dot{Q} * \delta}{A * \Delta\vartheta} = \frac{[W]}{[m] * [K]}$$

Die Wärmeleitfähigkeit und ihr Fließverhalten sind gleichzusetzen mit elektrischem Strom [40]. Daraus ergibt sich die Tatsache, dass thermische Isolatoren in Reihe oder parallel geschaltet sein können. Abbildung 18 verdeutlicht diesen Sachverhalt und stellt die zur Berechnung des Wärmestroms bei Reihen- und Parallelschaltungen genutzten Formeln vor.

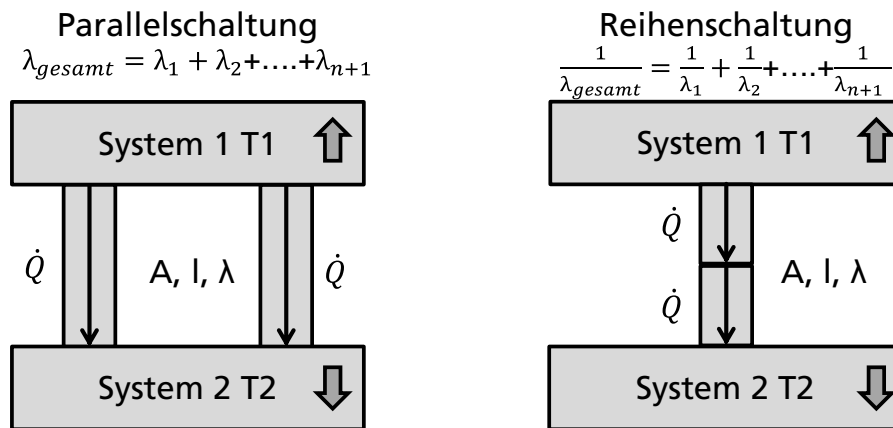


Abbildung 18: Reihen- und Parallelschaltung für den Wärmestrom

Aus diesen theoretischen Überlegungen lassen sich mehrere Möglichkeiten der Umsetzung einer Reduktion der Wärmeleitfähigkeit und damit einer Isolation des Tanks an den Auflagerblöcken ableiten. An den folgenden Parametern (vgl. Formel 14) können Variationen zur Reduktion der Wärmeleitfähigkeit vorgenommen werden.

- Reduktion der Auflagerfläche A zur Reduktion des Wärmeeintrags in den Tank
- Erhöhung der Wanddicke δ der Auflagerblöcke
- Reduktion des Wärmestroms \dot{Q}

Sowohl die Reduktion der Auflagerfläche als auch die Erhöhung der Wanddicke sind konstruktive Maßnahmen, während die Reduktion des Wärmestroms eine materialseitige Variationsmöglichkeit darstellt, die Wärmeleitfähigkeit zu senken.

Zur Veranschaulichung sollen die eingehenden Wärmeströme in einen Tank berechnet werden. Die eingehenden Parameter zur Berechnung des Wärmestroms für die bereits vorgestellten Tanksysteme sind in Tabelle 7 gegenübergestellt.

Tabelle 7: Parameter zur Berechnung des Wärmeeintrags in ein Tanksystem

	Prismatischer Tank Typ-B	Zylindrischer Drucktank Typ-C
Auflagerfläche A	82,5 m ²	3,14 m ²
Lagerdicke δ	500 mm	300 mm
Wärmeleitfähigkeit des Lagermaterials (Holz) λ	0,25 W/m·K [27]	0,25 W/m·K [27]
Temperatur System 1	20 °C	20 °C
Temperatur System 2	-163 °C	-163 °C
Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$	-183 K	-183 K

Aus Tabelle 7 ergibt sich demnach für die beiden Tanksysteme unter Nutzung der Formel 13 ein Wärmeeintrag über die Lager von:

- Tank Typ-B: **7.548 W** sowie
- Tank Typ-C: **478 W**.

Der Gesamtwärmeeintrag für die prismatische Tankgeometrie kann mit Hilfe der Formel 13 berechnet werden. Als Voraussetzung gilt, dass der Wärmestrom über die gesamte Mantelfläche konstant ist. Für die Berechnung eines zylindrischen Tanks muss die Formel angepasst werden

und ergibt sich aus der Zusammensetzung der Berechnung des Wärmestroms in einem Rohr (Mittelteil des Tanks) und der Addition des Wärmeübergangs durch einen Festkörper (Boden, Deckel) nach Formel 15:

Formel 15: Berechnung Wärmestrom in zylindrischem Tank

$$\dot{Q} = \frac{2 * \pi * l * \lambda * \Delta\vartheta}{\ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)} + A_{Deck} * \Delta\vartheta * \frac{\lambda}{\delta}$$

l: Tanklänge [m]
 \dot{Q} : Wärmestrom
 A_{Deck} : Deckfläche der Zylinder
 $\Delta\vartheta$: Temperaturgefälle
 λ : Wärmeleitfähigkeit
 δ : Wanddicke
 D_2 : Durchmesser außen
 D_1 : Durchmesser innen

Unter Nutzung der Parameter aus Tabelle 8 ergeben sich damit die folgenden Wärmeeinträge über die Tankoberfläche:

- Tank Typ-B: **55.006 W**⁵
- Tank Typ-C: **1.125 W**⁵

Tabelle 8: Parameterannahmen für die Berechnung des Wärmestroms in den Tank über die Oberfläche

	Prismatischer Tank Typ-B	Zylindrischer Tank Typ-C
Abmaße Tank [m]	(LxBxH) 70x35x20	(LxD) 12x2,5
Isolierte Fläche Tank (A)	9.017,5 m ²	100,1 m ²
Wandstärke Isolationsmaterial (δ)	600 mm	300 mm
Wärmeleitfähigkeit Isolationsmaterial (PUR) (λ)	0,02 W/m·K	0,02 W/m·K
Temperatur System 1 Außentemperatur	20 °C	20 °C
Temperatur System 2 Tankinnentemperatur	-163 °C	-163 °C
Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$	-183 K	-183 K

Werden die Leistungen der Wärmeeinträge über die Auflager zusätzlich zur Wärmeeinbringung über die Oberflächen addiert und anschließend ins Verhältnis gesetzt, ergeben sich die folgenden, in Abbildung 19 dargestellten, Verhältnisse.

Allein über die Auflager ergibt sich ein Wärmeeintrag von ca. 12 % für den Tank Typ-B und 30 % für den Tank Typ-C. Aus diesen Berechnungen lässt sich ableiten, wie groß der Einfluss der Lager auf die Gesamtisulationsleistung des Tanks ist. Dabei ist entscheidend, dass sich bei den Tanks des Typs-C das Verhältnis aus Oberfläche und Auflagerfläche anteilig stärker zu den Auflagern verschiebt und daher die Auflager als Isolatoren bei kleineren Tanks eine wichtigere Rolle spielen.

⁵ Die Oberfläche wird um die durch die Auflager kontaktierten Bereiche reduziert

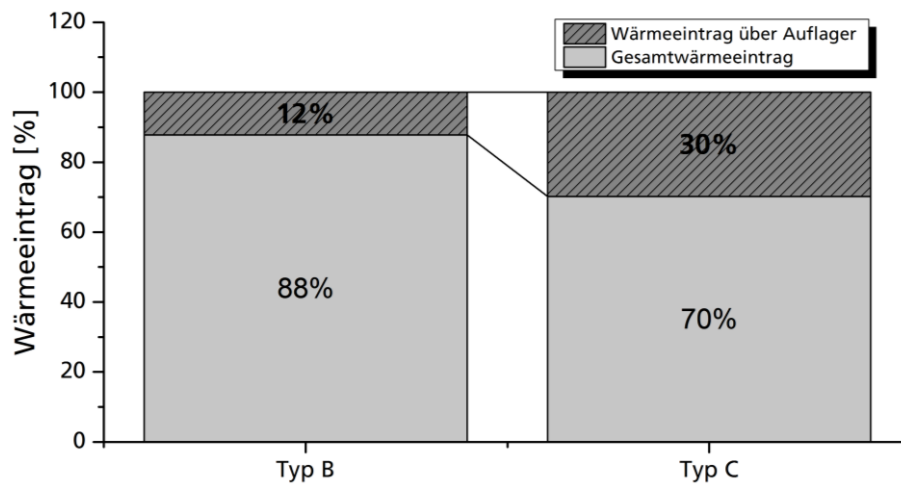


Abbildung 19: Anteiliger Wärmeeintrag der Auflager am Gesamtwärmeeintrag

Weiterhin soll der Einfluss der zur thermischen Isolation variierbaren Parameter auf die Auflager betrachtet werden. Die Variation der Parameter Auflagerfläche, Lagerdicke und Wärmeleitfähigkeit für den Tank Typ-B ergeben folgende, in Abbildung 20 dargestellte, Werte für den Wärmestrom. Eine Darstellung für Tank Typ-C wird hier nicht vorgenommen, da die Ergebnisse die gleichen Verläufe zeigen.

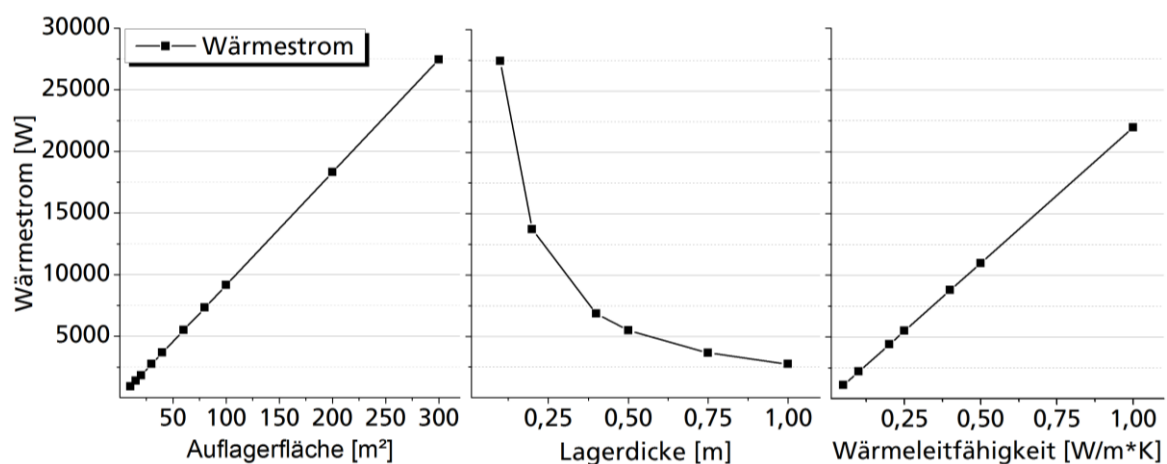


Abbildung 20: Wärmestrom in Abhängigkeit von der Parametervariation

Aus Abbildung 20 wird abgeleitet, dass insbesondere die Auflagerfläche und die Wärmeleitfähigkeit des Materials durch ihren linearen Verlauf einen wesentlichen Einfluss auf die eingebrachte Wärmeleistung in den Tank haben. Da die Lagerdicke einen degressiven Verlauf zeigt, ist der Einfluss dieser ab einer Stärke von 0,5 m nicht mehr signifikant auf den eingebrachten Wärmestrom.

4.3 Zusammenfassung der Belastungen an Auflagern

Die Ergebnisse, der im Rahmen der Definition von Anforderungen für die beiden untersuchten Tanksysteme durchgeführten Recherchen, sind nachfolgend in Abbildung 21 dargestellt. Für beide Tanksysteme sind diese aufgeteilt in mechanische und thermische Anforderungen. Die expliziten Ergebnisse für diese Anforderungen sind ebenfalls in Abbildung 21 dargestellt. Ausgehend von den theoretischen Überlegungen zu den mechanischen und thermischen Anforderungen, ergibt sich der Bedarf eines Materials, das die mechanischen Anforderungen erfüllt und die aufgezeigte Problemstellung eines hohen Wärmeeintrags über die Auflagerwerkstoffe verringert. Da das Kunstharzpressholz keine Modifikation zulässt und kein Alternativmaterial zu dem Kunstharzpressholz bekannt ist, beginnt im nachfolgenden Kapitel eine Materialentwicklung, welche mit einer Materialauswahl beginnt.

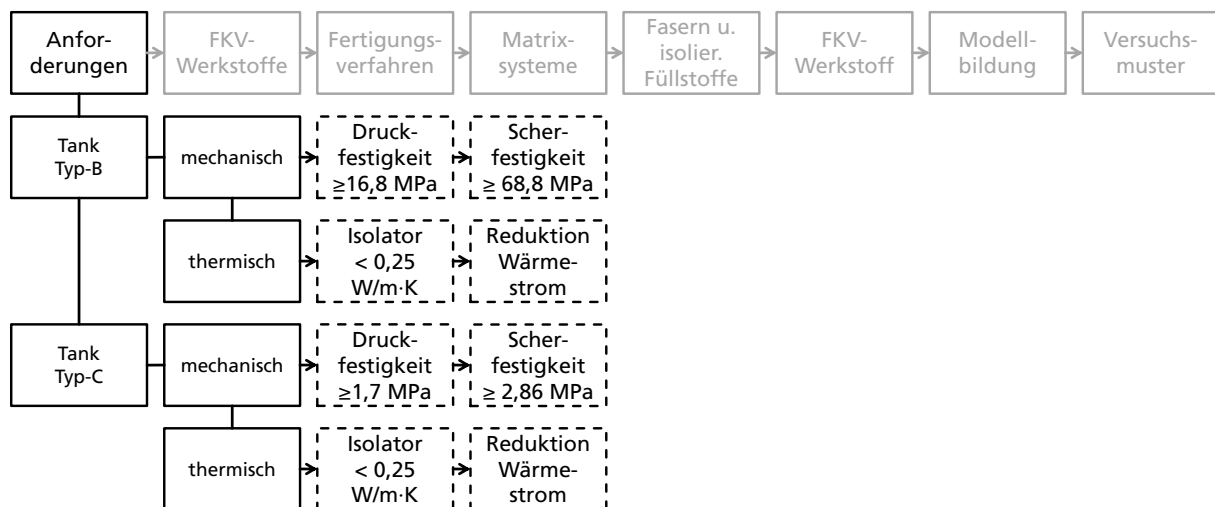


Abbildung 21: Zusammenfassung der Belastungen

5 Nutzung von FKV-Werkstoffen als Auflager für LNG-Tankschiffe

Im folgenden Kapitel sollen alle theoretischen Überlegungen zur Nutzung eines FKV-Werkstoffs für ein Auflagersystem diskutiert werden. Die dabei zu betrachtenden Aspekte sind in Abbildung 22 dargestellt. Es sollen alle theoretischen Überlegungen zu möglichen Einzelkomponenten für einen FKV-Werkstoff vorgestellt und ausgewählt werden. Da das finale Werkstoffverhalten maßgeblich von einer reproduzierbaren Fertigung abhängig ist, sollen alle geeigneten Fertigungsverfahren, die für die Herstellung eines FKV-Werkstoffs als Auflager möglich sind, diskutiert werden. Abschließend werden die experimentellen Untersuchungen zur Überprüfung der Werkstoffeigenschaften ausgewählt und beschrieben.

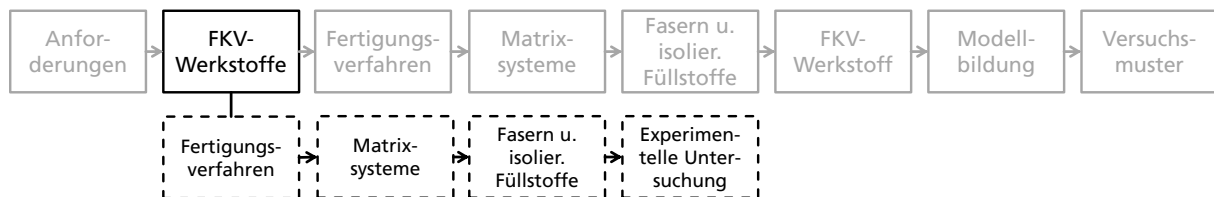


Abbildung 22: Auszuwählende Komponenten für die Entwicklung von FKV-Werkstoffen

5.1 Faserkunststoffverbunde

Faserkunststoffverbunde (FKV) sind eine technische Weiterentwicklung von Holz. Sie machen sich ebenfalls die Nutzung gerichteter Fasern, eingebettet in eine Matrix, zu eigen [34, 44]. Anders als bei natürlich gewachsenen Rohstoffen, wie bspw. Holz, können bei der Nutzung von chemisch herzustellenden Matrixsystemen und Verstärkungsfasern die Eigenschaften in Grenzen frei eingestellt werden. Gleichzeitig werden etwaige Nachteile der Werkstoffe durch Kombination dieser miteinander ausgeglichen. Die zu variierenden Parameter bilden bei den FKV die folgenden Komponenten [19, 34]:

- Fertigungsverfahren von Faserverbundstrukturen,
- Matrix,
- Fasern sowie
- zusätzliche Füllstoffe (bspw. Isolierend, elektr. leitend).

Das Zusammenwirken dieser Komponenten ermöglicht die Herstellung von FKV-Werkstoffen mit in Grenzen frei einstellbaren Eigenschaften. Die beeinflussbaren Parameter sind folgend in Abbildung 23 dargestellt.

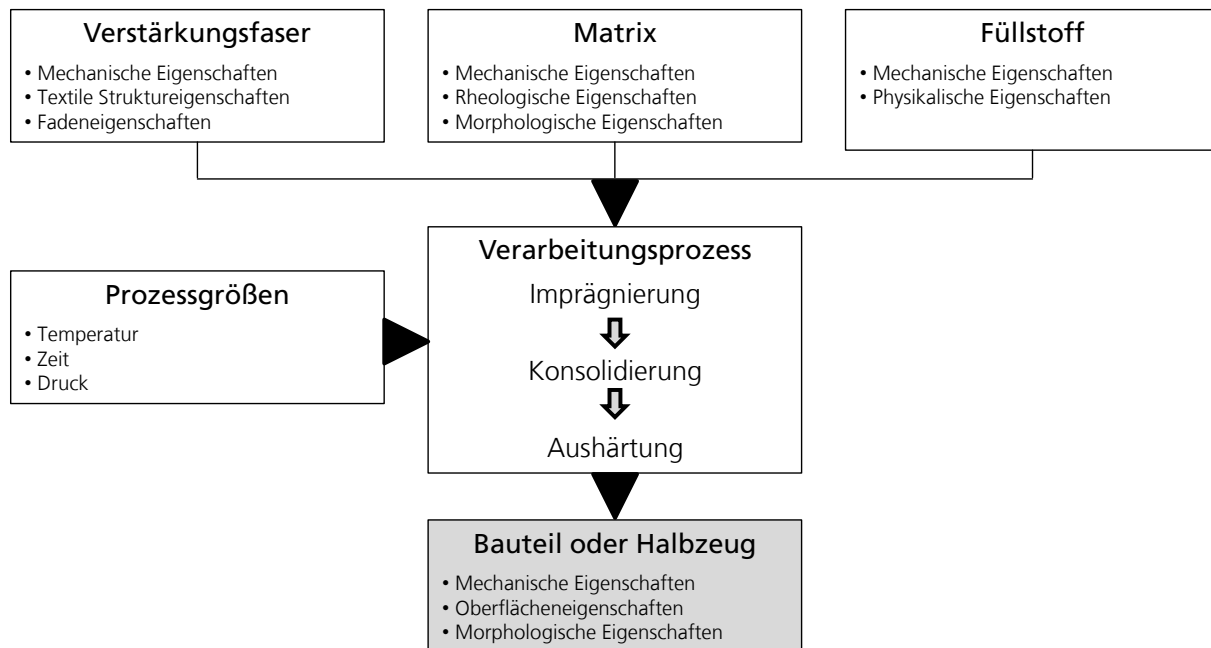


Abbildung 23: Verfahrensschritte zur Herstellung von Bauteilen aus FKV in Anlehnung an [45]

5.1.1 Fertigungsverfahren von Faserkunststoffverbunden

Die Herstellung von Bauteilen aus FKV erfolgt durch die Kombination aus Fasern, Matrix und Füllstoffen mit einem geeigneten Fertigungsverfahren. Der Verarbeitungsprozess ist bei allen Verfahren grundsätzlich gleich, aber durch die einwirkenden Prozessgrößen (siehe Abbildung 23) verschieden. Beim Imprägniervorgang werden die Fasern und die Füllstoffe mit der Matrix getränkt. Dies kann unter Nutzung der Schwerkraft oder aber durch eine entsprechende Druckdifferenz stattfinden. Anschließend wird beim Konsolidieren eine Formgebung des getränkten Fasermaterials durch ein geeignetes Formwerkzeug und teilweise mithilfe einer Druckbeaufschlagung durchgeführt. Entsprechend des gewählten Harzsystems muss eine Aushärtung durch den Start einer exothermen Reaktion im Harz herbeigeführt werden, bevor eine Entformung des Bauteils vorgenommen werden kann. Die exotherme Reaktion kann durch Wärmezufuhr gestartet werden oder, wie bei kalthärtenden Systemen, nach einer gewissen Zeit von selbst starten [19, 45 bis 47]. Die Fertigung eines Auflagers aus FKV wird wesentlich durch die Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens bestimmt. Für die Auflager kommen, auf Grund der genutzten und der vorherig beschriebenen Verstärkungsfasern und Füllstoffe, die folgenden Fertigungsverfahren in Frage, die alle für eine Herstellung erprobt werden.

5.1.1.1 Gießverfahren

Beim Gießen der Matrix in eine offene Form werden die Füllstoffe in die reaktive Matrix aus Harz und Härter eingemischt. Anschließend wird das gesamte Gemisch durch einen Gießprozess in eine offene Form gefüllt. Eine zusätzliche Aufbringung von Druck und einer damit einhergehenden Verdichtung des Materials kann zu einer verbesserten Bauteilqualität in Form von geringeren Lufteinschlüssen führen. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der einfachen und kostengünstigen Umsetzung sowie den geringen Form- und Maschinenkosten. Nachteilig ist bei diesem Verfahren, dass es bei einem manuellen Mischprozess zwischen Matrix und Füllstoffen zu einem starken Einschluss von Luft kommen kann [48, 49].

5.1.1.2 Vakuuminfusionsverfahren

Beim Vakuuminfusionsverfahren mit einer geschlossenen Form werden die Füllstoffe in die Kavität eingelegt. Anschließend wird die Kavität verschlossen und durch eine Vakuumpumpe vollständig luftevakuiert. Durch den in der Kavität entstandenen Unterdruck wird das bereits gemischte Matrixsystem in die Form gesogen, so dass die in der Form befindlichen Füllstoffe und Fasern vollständig mit einer Matrix umgeben werden. Nach dem Aushärten der Matrix kann das Bauteil entformt werden. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der endkonturnahen und reproduzierbaren Fertigung von Bauteilen. Nachteilig sind die erhöhten Formkosten sowie die benötigte Maschinenausstattung zur Durchführung des Verfahrens [19, 34, 50, 51].

5.1.1.3 VARTM-Verfahren

Weiterhin soll das **V**acuum **A**ssisted **R**esin **T**ransfer **M**oulding - VARTM-Verfahren. Der Aufbau ist ähnlich dem Vakuuminfusionsverfahren, jedoch wird hierbei ein zusätzlicher Überdruck zum Einpressen des Harzes in die Kavität aufgebracht. Der Vorteil liegt in einer schnelleren Infusion sowie in der Möglichkeit, größere und stärker gefüllte Kavitäten zu infundieren. Nachteilig ist der Bedarf von überdruckgeeigneten Formen und zusätzlichen Pumpen [46, 51, 52].

5.1.2 Matrixsysteme

Nach SCHÜRMANN [34] bildet die Matrix die Einbettungsmasse, in die die Fasern umgebend eingebracht werden. Die Matrix kann aus verschiedenen Stoffen bestehen und übernimmt nach EHRENSTEIN [19] die nachfolgend genannten Eigenschaften:

- Einleitung von Kräften in Faserwerkstoffe,
- Überleitung der Kräfte zwischen den Fasern,
- Bestimmung der geometrischen Faserlage sowie
- Schutz der Fasern vor äußeren Einflüssen.

Im Folgenden soll nur auf Kunststoffmatrixsysteme und dabei insbesondere auf Epoxidharze eingegangen werden. Grundsätzlich kommen als Matrixwerkstoff vor allem Kunststoffe aus Thermoplasten und Duromeren in Frage. Elastomere werden nur in sehr vereinzelten Anwendungsfällen bei einachsigen Spannungszuständen als Matrix genutzt (Keilriemen im Auto). Dahingegen werden Thermoplaste und Duromere, bedingt durch ihre guten Verarbeitungseigenschaften, in vielen Anwendungen als Matrixwerkstoff verarbeitet. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass auf Grund des starken Kriechens der Thermoplaste ein Einsatz als Matrix in Strukturbauteilen nicht ohne geometrische Verstärkungen erfolgen kann, weshalb die stark vernetzten Duromere die meistgenutzte Matrix bei der Fertigung von Strukturbauteilen sind [34]. Die duromeren Kunststoffe liegen in den in Abbildung 24 dargestellten Ausprägungsformen vor.

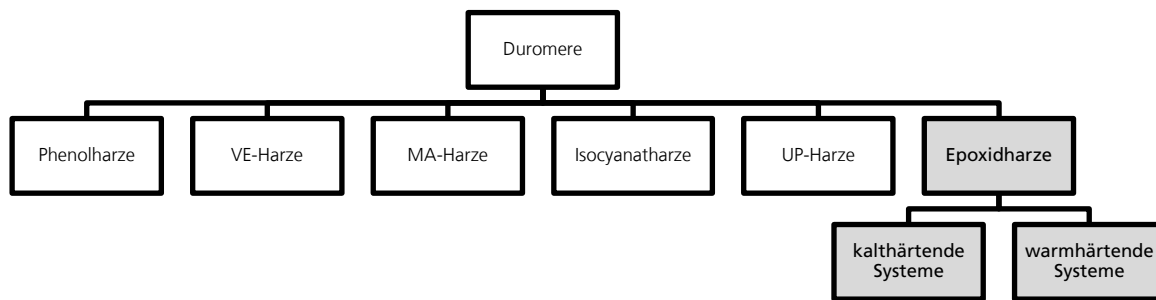


Abbildung 24: Unterteilung duomerer Kunststoffe [19]

Duromere Kunststoffe werden als Reaktionsharze eingesetzt. Dazu werden die zwei Komponenten aus Harz und Härter miteinander vermischt und anschließend zur Reaktion gebracht. Diese kann durch die Zugabe von Be- und Entschleunigern beeinflusst werden. Die Reaktion findet immer exotherm statt, so dass die Aushärtung eines Reaktionsharzes immer mit einer Wärmeentwicklung verbunden ist.

Für die Herstellung von Strukturbauteilen aus FKV werden zumeist Epoxidharze (EP) als Matrixsystem genutzt. Dies ist mit Ihrer hohen Beständigkeit gegenüber Umweltbelastungen (Temperatur, Feuchtigkeit) und chemischen Einflüssen begründet [53]. Darüber hinaus weisen Epoxidharze eine gute Haftung an Fasern sowie hervorragende mechanische Eigenschaften (E-Modul = 3 bis 5 GPa, $\sigma_{\text{Zug}} \approx 100 \text{ MPa}$) für die Herstellung von Strukturbauteilen auf [19, 34, 48].

Epoxidharzsysteme können als kalthärtende und warmhärtende Systeme, die durch eine Polyaddition vernetzen [44], eingesetzt werden. Die kalthärtenden Systeme starten eine Reaktion bei Raumtemperatur ($> 15 \text{ °C}$), benötigen dabei eine längere Zeit für die Aushärtung und besitzen zumeist einen niedrigeren Glasübergangspunkt⁶. Der Glasübergangspunkt kann durch einen anschließenden Temperungsprozess unter Zufuhr von Wärme wahlweise erhöht werden. Die warmhärtenden Systeme hingegen werden erst durch Zufuhr von Energie zu einer Reaktion gezwungen und anschließend einem Temperungsprozess unterzogen, der eine vollständige Vernetzung der Harz-Härter-Molekülketten in einer kürzeren Zeit garantiert. Durch diesen Prozessschritt können die mechanischen Eigenschaften verbessert werden [48]. Eine Steigerung des T_g kann dadurch ebenfalls erzielt werden. Allgemeingültige Kennwerte für die einzelnen Harzsysteme können auf Grund der Vielzahl an Systemen und deren variierenden Eigenschaften nur schwer angegeben werden. Für jeden Anwendungsfall muss ein Harzsystem demnach explizit ausgewählt werden.

Im folgenden Abschnitt sollen die theoretischen Überlegungen zur Matrixauswahl dargestellt werden. Alle Versuche sollen mit einem kaltaushärtenden Epoxidharzsystem, das durch eine Nachtemperung zu einer maximalen Festigkeit gebracht werden kann, durchgeführt werden. Die kaltaushärtenden Matrixsysteme verursachen geringere Fertigungskosten, da auf eine aufwendige Formbeheizung, die eine exotherme Reaktion des Harzes auslöst, verzichtet werden kann. Das Harzsystem härtet bei Umgebungstemperaturen ab 15 °C vollständig aus. Da die Festlager als Strukturbauteile mit kraftübertragenden Eigenschaften ausgelegt sind, muss das Material eine entsprechende Festigkeit aufweisen. Üblicherweise werden auf Grund der guten

⁶ Übergang vom energieelastischen in den entropieelastischen Bereich einhergehend mit Materialeigenschaftsänderungen - T_g .

mechanischen Eigenschaften für diesen Einsatzzweck Epoxidharze genutzt [19, 34, 45, 50]. Abbildung 25 zeigt die variierenden Eigenschaften unterschiedlicher Harzsysteme hinsichtlich der durchschnittlich erreichbaren Festigkeiten und der Aushärtungstemperaturen.

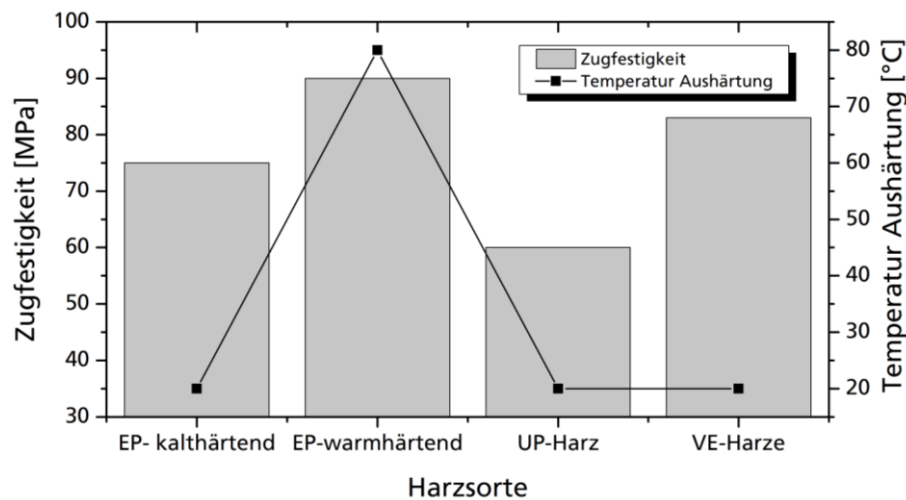


Abbildung 25: Vergleich verschiedener Harzsysteme

Die Viskosität ist bei der Auswahl eines Harzes für diesen Anwendungsfall nicht unmittelbar ausschlaggebend, da die meisten Epoxidharze bereits eine geringe Viskosität aufweisen und somit für die meisten Anwendungen zur Füllung von Mehrschichtsystemen geeignet sind [47].

Für die Herstellung eines Auflagerblocks aus Faserverbundstrukturen muss das Epoxidharz eine lange Topfzeit aufweisen. Auf Grund der Größe des Auflagers ist eine langsame Tränkung der Form zu erwarten. Die Topfzeit des Harzes kann ferner durch eine entsprechende Kühlung des flüssigen aber reaktiven Matrixmaterials verlängert werden. Alle Epoxidharzsysteme härten durch eine Polyaddition aus. Die Aushärtung von Epoxidharzsystemen geht mit einer exothermen Reaktion unter Wärmeentwicklung einher, wobei eine zu stark einsetzende Exothermie zu einer starken Wärmeentwicklung im Harzsystem führt, so dass es zu einer Verbrennung des Werkstoffs und damit auch des Bauteils kommen kann [54]. Dieser Aspekt muss auf Grund der großen zu fertigenden Bauteile und einem damit einhergehenden großen Harzansatz bei der Matrixauswahl berücksichtigt werden. Für eine erste Harzauswahl werden die Harze:

- Epoxidharz L mit dem Härter EPH 161™ für Vorversuche [35] und
- Ampreg 22™ mit diversen Härtern

gewählt. Epoxidharz L ist ein für die Luftfahrtbranche zugelassenes Gießharz (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9: Kennwerte Matrix Epoxidharz L und Härter EPH 161

Eigenschaften	Epoxidharz L und Härter EPH 161™
Mischungsverhältnis Harz :Härter [M%]	100:40
Aushärtungstemperatur	>18 °C
Nachhärtung Zeit und Temperatur	15 h bei 60 °C
Zugfestigkeit	70 MPa
Bruchdehnung	7 %
Glasübergangspunkt T_g	75 °C
Schrumpfung	k. A.
Topfzeit	1,5h

Als Alternativmaterial wird das Harzsystem Ampreg 22 von der Firma CTM gewählt. Dieses Harz wird mit unterschiedlichen Härtern, die sich durch variierende Topfzeiten unterscheiden, am Markt vertrieben. Die verfügbaren Härter sind

- *Fast* - Topfzeit 25 Minuten
- *Standard* - Topfzeit 90 Minuten
- *Slow* - Topfzeit 145 Minuten
- *Extra Slow* - Topfzeit 720 Minuten

so dass die Wahl auf den Härter Slow mit einer maximalen Topfzeit von 2,5h⁷ fällt. Als ein Nebeneffekt ist das Harz nach GL und LR Klassifikation für den Einsatz im Schiffbau zugelassen. Dies bildet die Grundlage für einen möglichen späteren Einsatz als Auflagerwerkstoff und bringt eine Senkung der Kosten durch wegfallende Zulassungsverfahren mit sich [34]. Die wesentlichen Merkmale des Harzes sind in der folgenden Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Kennwerte Matrix Ampreg 22 und Härter Ultra Slow [49]

Eigenschaften	Ampreg 22 und Härter Slow™
Mischungsverhältnis Harz :Härter [M%]	100:28
Aushärtungstemperatur	>15 °C
Nachhärtung Zeit und Temperatur	16h bei 50 °C
Zugfestigkeit	74 MPa
Bruchdehnung	4,5 %
Glasübergangspunkt T _g	82 °C
Schrumpfung	1,6 %
Topfzeit	2,5h
Dichte	1,14 g/cm ³
Wärmeleitfähigkeit	Keine Angaben in [55] allgemeiner Wert entnommen aus [33] mit 0,2 W/m·K

5.1.3 Verstärkungsfasern

Die Aufgabe des Faserwerkstoffs in einem FKV ist die Aufnahme und Übertragung äußerer Belastungen. Dazu müssen die Fasern eine hohe Zugfestigkeit sowie eine ausreichend große Steifigkeit, bei einer gleichzeitig geringen Dichte zur Erfüllung des Leichtbaucharakters, mitbringen [34, 46]. Die wesentlichen Eigenschaften der Fasern werden durch die folgenden Parameter bestimmt:

- Fasermaterial,
- Faserform,
- Fasergröße (Filamentdurchmesser, Faserlänge)
- Orientierung,
- Kerbfreiheit sowie
- Eigenspannungen.

Verstärkungsfasern können zwischen Kurz- und Langfasern unterschieden werden [56]. Dabei ist der Größeneffekt sehr entscheidend. Je geringer der Querschnitt einer Faser, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit einer Fehlstelle und umso besser sind ihre physikalischen Eigenschaften

⁷ auseichende Topfzeit zur Füllung der Kavität

[34, 44]. Weiterhin ist die Orientierung der Faser entscheidend für die Lastabtragung eines Bauteils. Durch die Orientierung der Fasern wird festgelegt, ob es sich bei einem Bauteil um ein anisotropes oder isotropes Bauteil handelt [34]. Anisotrope Bauteile haben unterschiedliche Eigenschaften in verschiedene Beanspruchungsrichtungen und werden grundsätzlich immer durch die Nutzung von gerichteten Langfasern erzeugt. Diese können noch einmal in unidirektionale (Orientierung in eine Richtung) und mehrdirektionale Bauteile (Orientierung in mehrere Richtungen – zumeist $0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ$) unterschieden werden [50, 57]. Bei der Nutzung ungerichteter Kurzfasern werden quasiisotrope Bauteileigenschaften erzielt mit gleichen Eigenschaften in alle Beanspruchungsrichtungen [56]. Für die Optimierung der Biegeeigenschaften von FKV ist es besonders wichtig, während der Herstellung und Verarbeitung die Einbringung von Kerben in die Faser quer zur Faserhaupttrichtung zu vermeiden. Auf die Entstehung von Eigenspannungen kann der Verarbeiter von Faserhalbzeugen keinen Einfluss nehmen, da diese Spannungen ausschließlich im Herstellungsprozess durch eine unterschiedlich schnelle Abkühlung der Fasern zwischen Faseroberfläche und -kern entstehen [34].

Nachfolgend soll nur auf die für ein alternatives Auflagermaterial geeigneten Faserarten, Faserformen und Faserorientierungen eingegangen werden. Ferner bestimmen die Faserform und Faserart maßgeblich den Fertigungsprozess des faserverstärkten Bauteils [46, 56].

Die am häufigsten genutzten Werkstoffe für Fasermaterialien sind Glas, Aramid und Kohlenstoff [46]. Insbesondere Glasfasern sind durch ihren geringen Preis sehr weit verbreitet und können in sämtlichen Formen verarbeitet werden. Kohlenstofffasern werden auf Grund ihres hohen Preises ausgeschlossen. Aramidfasern stellen durch ihr schlechtes Verhalten gegenüber Feuchtigkeit bei gleichzeitig ebenfalls hohen Kosten gegenüber Glasfasern für diesen Anwendungsfall keine Alternative dar. Daher wird als Faserart zur Verstärkung des EP-Matrixsystems eine Glasfaser genutzt.

Glasfasern zeichnen sich durch ihre geringen Kosten bei einer für die meisten Anwendungsfälle ausreichenden Zugfestigkeit (durchschnittlicher Berechnungswert $\approx 1800 \text{ N/mm}^2$) und Steifigkeit ($E \approx 70.000 \text{ N/mm}^2$) aus [56]. Ein weiterer Vorteil ist, dass Glasfasern ein Kriechen von Bauteilen verhindern. Ebenfalls sind Glasfasern gegen die meisten chemischen Kurzeinflüsse resistent, wobei ein direkter Kontakt mit Wasser vermieden werden sollte, da die Festigkeitseigenschaften durch Wasserkontakt erheblich sinken [44, 56]. Darüber hinaus wirken sich tiefkalte Temperaturen positiv auf die Festigkeiten von Glasfasern aus [34]. Bei einer Temperatur von -180°C beträgt die Festigkeit das Zweifache jener bei einer Temperatur von 23°C .

Glasfasern werden in variierenden Formen (Endlosfaser, Kurzfaser) verarbeitet [56]. Die kleinste Form sind dabei die Kurzfasern, die als Zuschnitt mit einer Länge von 2 – 6 mm in EP-Matrixsysteme eingerührt werden können, so dass ein quasiisotroper, verstärkter Kunststoff entsteht [57]. Ferner werden Glasfasern als Lang- bzw. Endlosfaser verarbeitet. Eine Verarbeitung in Strukturbauteilen wird insbesondere durch verwobene Glasfaserfilamente, die in Mattenform als Gelege und Gewebe vorliegen, realisiert [34, 58]. Eine besondere Faserverstärkung ist die Einbringung von Verstärkungsfasern in Halbzeugformen. Die Halbzeuge (bspw. in Stabform) bestehen aus Fasern und ausgehärtetem Harz. Sie werden im Pultrusionsverfahren durch einen Tränkungsprozess von Endlosfasern hergestellt. Nach dem Aushärtungsprozess werden die Halbzeuge als Endlosware auf Rollen kommissioniert oder entsprechend der benötigten Profillängen abgelängt [46, 51, 52, 56, 58].

Bei einer FKV-Werkstoffneuentwicklung muss eine frühzeitige Auswahl der Faserform im Entwicklungsprozess getroffen werden. Ursache ist, dass die lastabtragenden Eigenschaften und die durch das Harz verursachte Sprödigkeit eines Bauteils maßgeblich von der Faserform abhängig sind [19, 34]. Die Form eines Auflagers weicht stark von üblichen Faserverbundbauteilen ab, die aus Gründen des Leichtbaus mit dünnen Querschnitten bei hohen Steifigkeiten ausgelegt werden. Die Auflager weisen Dicken und Breiten > 250 mm auf. Zur Befüllung dieses großen Volumens muss eine große Menge an Matrixwerkstoff genutzt werden, weshalb sich die Nutzung von Fasern in Mattenformen für diesen Anwendungsfall nicht eignet. Beginnend wird eine Kurzfaser aus Glas (Länge 3 mm) als festigkeitssteigernder Faserfüllstoff betrachtet. Die Kurzglasfaser bietet den Vorteil, im Vergleich zu Fasergelegen und -geweben, dass diese besonders beim Fertigungsverfahren des Gießens durch ein vorheriges Einrühren problemlos hinzugefügt werden kann. Ebenfalls erzeugt die Nutzung von Kurzglasfasern ein Material mit quasiisotropen Eigenschaften. Daneben sind Kurzfasern ebenfalls günstiger als Langfasern bzw. Fasergelege/Fasergewebe, so dass eine Senkung der Fertigungskosten erzielt werden kann. Beispielhaft ist nachfolgend eine Schüttmenge an Kurzglasfasern dargestellt. Es wird eine Kurzglasfaser der Firma R&G mit den in Tabelle 11 dargestellten Kennwerten genutzt.



Abbildung 26: Kurzglasfasern

Tabelle 11: Kennwerte Kurzglasfaser 3 mm [59]

Eigenschaften	Kurzglasfaser R&G
Faserart	E-Glas
Länge	3 mm
Durchmesser	9 bis 14 μm
Dichte	2,55 g/cm^3
Schlichte	Silanbasis
Wärmeleitfähigkeit	Keine Angaben in [59] Wert entnommen aus [19] mit 0,8 $\text{W/m}\cdot\text{K}$

Neben der Verstärkung mit Kurzfasern wird eine zweite Idee der Faserverstärkung von Auflagerblöcken entwickelt. Als Vorbild dient dabei die Nutzung von Stahlbewehrung in Beton. Im Bauwesen wird Stahlbewehrung in Beton eingebracht, um die Sprödigkeit des Betons auszugleichen, Zug- und Biegekräfte aufzunehmen und gleichzeitig den Lastabtrag bzw. die ertragbaren Druckkräfte im Fundament von Bauwerken zu erhöhen [60, 61]. Für die Nutzung dieser Vorgehensweise bei Auflagern besteht die Idee darin, Glasfaserstäbe zu verwenden, die wie eine Bewehrung in die Epoxidharzmatrix eingebracht werden. Dazu werden abgelängte Glasfaserstäbe über eine Schablone in die Form eingebracht und im anschließenden Imprägnierungsvorgang der Form von der Harzmatrix umschlossen. Dadurch entsteht ein Auflager mit gerichteten Glasfasern und anisotropen Eigenschaften. Die Glasfaserstäbe können

in drei Richtungen ausgerichtet werden und bieten die Möglichkeit einer zielgerichteten Verstärkung der Auflager. Die Verstärkung bewirkt eine Erhöhung der Druck-, Biege- und Zugfestigkeit der Auflagerwerkstoffe. Als Material für die Glasfaserstäbe werden 2 mm dicke Stäbe mit den in Tabelle 12 dargestellten Kennwerten von der Firma R&G ausgewählt.

Tabelle 12: Kennwerte Glasfaserstäbe mit 2 mm Durchmesser [62]

Eigenschaften	Glasfaserstäbe R&G
Faserart	E-Glas mit Vinylester-Matrix
Länge	Endlos
Durchmesser	2 mm
Dichte	2 g/cm ³
Schlichte	k.A.
Druckfestigkeit	270 MPa
Faservolumenanteil	> 65 %
Wärmeleitfähigkeit	1,3 W/m·K [63]

Eine Glasfaserstabgitterstruktur ist in Abbildung 27 beispielhaft dargestellt.

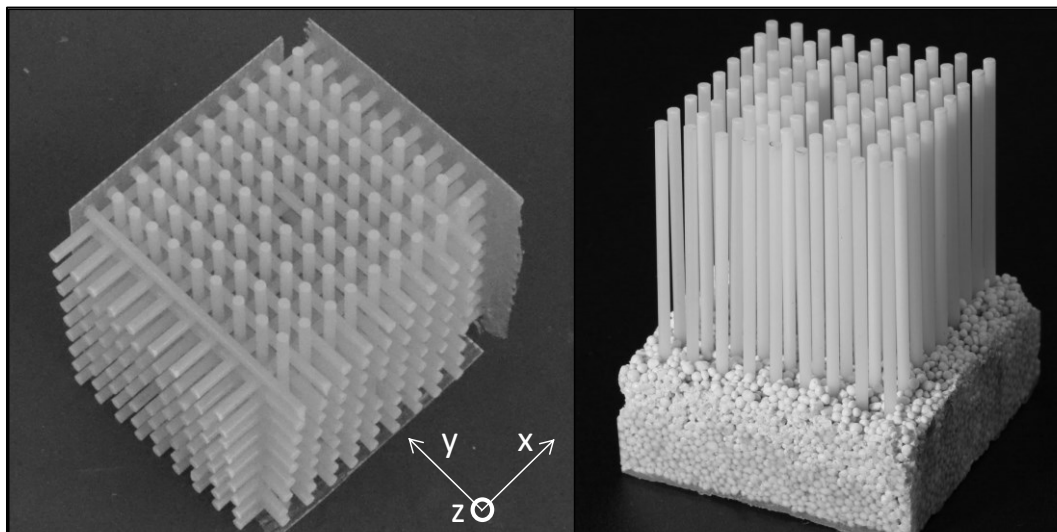


Abbildung 27: Glasfaserstabgitterstruktur orientiert in drei Richtungen (x, y, z - Richtung) (li.); Glasfaserstäbe eingebracht in Harzmatrix (re.)

5.1.4 Zusätzliche Füllstoffe - thermisch isolierend

Neben der Einbringung von festigkeitssteigernden Fasern, lassen sich Kunststoffmatrixsysteme aus Reaktionsharzen mit weiteren Zusätzen modifizieren, so dass eine weitere Funktionalisierung des FKV erzielt werden kann. Dabei wird zwischen Additiven und Füllstoffen unterschieden [46] [58]. Additive übernehmen in einer Kunststoffmatrix Aufgaben, die keinen direkten Einfluss auf die Funktion des Werkstoffs haben. Vielmehr dienen sie der Optimierung, bspw. des Herstellungsprozesses, und damit indirekt der späteren Güte der Werkstoffe. Sie werden zumeist in kleinen Mengen beigesetzt und vollständig in die Matrix des FKV aufgenommen, so dass sich die Eigenschaften der Additive im Verlauf des Lebenszyklus eines FKV immer mit den Eigenschaften des Matrixwerkstoffs ändern [58]. Beispiele für die Anwendung bei EP-Reaktionsharzen sind Schaumbildner, Schrumpfminderer oder Elastifizierer [64].

Die Zugabe von Füllstoffen hingegen verändert die funktionellen Eigenschaften eines FKV nachhaltig. Sie erfolgt ebenfalls im Herstellungsprozess des FKV, jedoch werden, anders als bei

den Additiven, die Füllstoffe nicht vollständig in die Matrix aufgenommen, sondern von dieser nur umschlossen, so dass die Eigenschaften der Füllstoffe erhalten bleiben. Es entstehen dabei Mehrschichtsysteme [65]. Zumeist werden die Füllstoffe genutzt, um mechanische, isolierende, dämpfende oder elektrische Eigenschaften der Kunststoffmatrizes zu variieren. Ebenfalls kann durch die Zugabe von Füllstoffen eine Kostenreduktion durch das Einsparen von Matrixwerkstoff erzielt werden [51, 57, 58]. Entscheidend für die Wirkung eines Füllstoffs in einem FKV sind das Verhältnis der Länge und der Dicke des Füllstoffs. Dieses Verhältnis wird als „Aspect Ratio-Verhältnis“ bezeichnet und beeinflusst die Steifigkeit eines FKV. Eine Kugel bspw. hat ein Verhältnis von 1:1, wohingegen Fasern Verhältnisse von $> 100:1$ besitzen [51]. Daraus kann abgeleitet werden, dass das Einbringen von Kugeln keinen positiven Einfluss auf die Steifigkeit eines FKV hat. Nur Füllstoffe mit großen Längen und kleinen Dicken wirken sich auf Grund ihrer Geometrie positiv auf die Steifigkeit von FKV aus.

Für isolierende Füllstoffe kommen, auf Grund ihrer Eigenschaften und der Möglichkeit gezielt Luft zur Isolation von Epoxidharzsystemen einzuschließen, vor allem kugelförmige und luftgefüllte Füllstoffe in Frage. Zudem führt der Einsatz kugelförmiger Füllstoffe nicht zur Entstehung einer Anisotropie des Werkstoffs [66]. Die Wahl als Füllstoff für ein LNG-Auflagersystem fällt auf Mikrohohlglaskugeln in verschiedenen Durchmessern sowie auf ein Blähglasgranulat mit dem Markennamen Poraver®.

Mikrohohlglaskugeln sind Glaskugeln mit einem gasgefüllten Hohlraum. Diese werden mithilfe eines Treibmittels aufgeblasen, bis eine Wandstärke von ca. 1-10 % des Kugeldurchmessers erreicht ist. Mikrohohlglaskugeln sind durch ihre hervorragenden isolierenden und dämpfenden Eigenschaften insbesondere als Füllstoff bei der Anwendung zweikomponentiger Reaktionsharze geeignet [57, 66 bis 68]. Die Kugelgrößen variieren zwischen 1 und 300 μm . Für die FKV Auflager werden Kugeln der Firma 3M verwendet. Die Kennwerte sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Materialkennwerte Mikrohohlglaskugeln [69, 70]

Eigenschaften	Mikrohohlglaskugeln 3M
Kugelnendichte	0,12/0,21 g/cm ³
Mittlere Teilchengröße	65 μm
Glasart	Borosilikatglas
Volumen % Glas	18
Volumen % Luft	82
Kornfestigkeit	113 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0,06 bis 0,16 W/m·K (ohne Quellenangabe)

Neben den Mikrohohlglaskugeln wird ein Blähglasgranulat zur Erhöhung der Isolationswirkung von Epoxidharzen für FKV-Werkstoffe gewählt. Das Blähglasgranulat besteht aus geschäumten Glaskugeln, die in verschiedenen Durchmessern erhältlich sind [71]. Dies ermöglicht die Erzeugung einer optimalen Packungsdichte bei einem Einsatz als Füllstoff.

Das Blähglasgranulat ist im Gegensatz zu den Mikrohohlglaskugeln ein offenzelliger, poröser Füllstoff. Dadurch kann es bei einer Infusion mit Harz zu einem Aufsaugen des Harzes in die Hohlräume des Blähglasgranulates kommen. Mit der Größe der Füllstoffe nimmt ebenfalls die Porosität zu, so dass Kugeldurchmesser bis zu 2 mm nur sehr kleine Öffnungen haben. Dies wirkt sich vorteilhaft auf eine reduzierte Harzaufnahme aus. Die technischen Daten des Blähglasgranulats sind nachfolgend in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Materialkennwerte geschäumte Glaskugeln [72]

Eigenschaften	Blähglasgranulat Poraver
Kugelnendichte	0,4 g/cm ³
Mittlere Teilchengröße	1 bis 2 mm
Glasart	Recyclingglas
Kornfestigkeit	1,6 MPa
Wärmeleitfähigkeit	0,8 W/m·K entspricht Standardglas [41]

In Abbildung 28 sind die beiden für die experimentellen Versuche genutzten isolierenden Füllstoffe bildlich dargestellt.



Abbildung 28: Mikrohohlglaskugeln vergrößert (li.), Mikrohohlglaskugeln Schüttmenge (mi. li.), Blähglasgranulat Schüttmenge (mi. re.) und Blähglasgranulat vergrößert (re.)

Die kugelförmige Form der Füllstoffe lässt sich theoretisch durch eine Kombination unterschiedlicher Durchmesser maximal in einem vorgegebenen Volumen anordnen. Nachfolgend soll die optimale theoretische Packungsdichte nach FULLER UND THOMPSON für ein vorgegebenes und zu füllendes Volumen nach folgender Formel 16 berechnet werden. Dies ermöglicht eine zielgerichtete Auswahl an Füllstoffzusammensetzungen für das Blähglasgranulat, da dieses in mehreren Durchmessern (0,25 mm bis 10 mm) verfügbar ist.

Formel 16: Dichteste Packung an Füllstoffen nach FULLER UND THOMPSON entnommen aus [73]

$$A = 100 * \left(\frac{d_a}{D} \right)^n$$

- A: Siebdurchgang bei Sieblochweite d
 d_a : beliebiger Korndurchmesser zwischen 0 und D
D: Größtkorndurchmesser des Korngemenges
n: Körnungsexponent

Wird die Formel 16 für eine Berechnung der dichtesten Packung bei Blähglasgranulat genutzt, ergeben sich folgende Rahmenbedingungen für das Modell. Das Blähglasgranulat wird mit Durchmessern von 0,2 bis 3 mm angenommen. Eingebettet in eine Harzmatrix soll dies in einem theoretischen Volumen von einem Liter berechnet werden. Als Körnungsexponent „n“ wird nach [74] der Wert 0,5 genutzt, weil dieser für die Berechnung nach der Idealsieblinie mit möglichst geringen Hohlräumen optimal ist (vgl. Abbildung 29). Da die genutzte Formel für eine Verteilung von Gesteinsgrößen entwickelt wurde, muss bei der Berechnung von Füllstoffen für eine Epoxidharzmatrix darauf geachtet werden, dass der maximale Größtkorndurchmesser D zur Berechnung des Füllstoffbedarfs größer gewählt wird, als der tatsächlich genutzte maximale Korngrößendurchmesser. Die Besonderheit liegt dabei darin, dass die Formel für eine maximale

Füllung von runden Gesteinen in einem Volumen ohne eine die Gesteine verbindende Matrix entwickelt worden ist. Bei einer direkten Anwendung dieser Formel auf eine mit runden Füllstoffen gefüllte EP-Matrix verbleibt ansonsten kein Volumen für die benötigte Harzmatrix, die für eine stoffschlüssige Verbindung der Füllstoffe jedoch zwingend erforderlich ist. Im folgenden Beispiel in Abbildung 29 zeigt sich dies im unterschiedlichen Verlauf der beiden Kurven. Die obere Kurve (Viereck) stellt die Masseprozent-Verteilung für eine vollständige Füllung des Volumens von einem Liter mit Füllstoffen dar, so dass das maximale Füllstoffvolumen 100 % beträgt. Die untere Linie stellt die Verteilung bei einer gezielten Berechnung mit einem zu groß gewählten Maximaldurchmesser der Füllstoffe (4 mm) dar. Daraus ergibt sich ein theoretisches Maximalfüllstoffvolumen von ca. 85 % so, dass 15 % des Gesamtvolumens für eine Füllung mit Epoxidharz verbleiben. Diese 15 % würden theoretisch für eine stoffschlüssige Verbindung der Füllstoffe bei einem möglichst hohen Füllstoffgehalt ausreichen.

Angewendet auf die Entwicklung eines Auflagersystems führt diese Berechnung zu dem Ergebnis, dass bei einer Nutzung von 1 bis 2 mm großen kugelförmigen Füllstoffen ein Füllstoffvolumengehalt zwischen 30 und 50 % erreicht werden kann. Dieser Wert ist im Hinblick auf die Verbesserung einer thermischen Isolation von Epoxidharzsystemen anzustreben. Weiterhin kann eine Kostensenkung durch eine Reduktion der Matrixwerkstoffmenge erzielt werden.

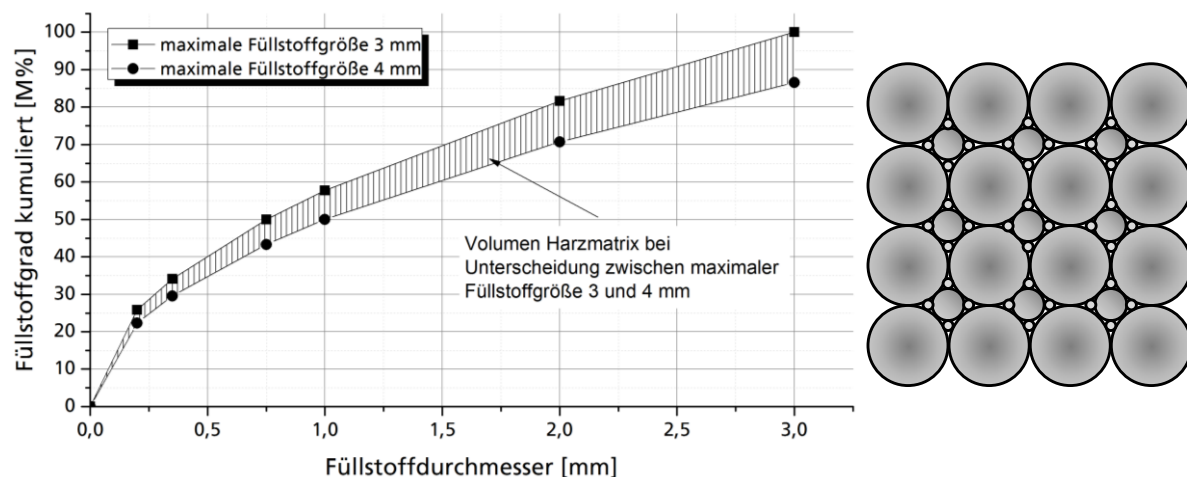


Abbildung 29: Kornverteilung für eine dichteste Packung bei Blähglasgranulat (li.); schematische Darstellung dichteste Packung bei runden Füllstoffen (re.)

5.2 Auswahl experimenteller Versuche zur Untersuchung der Eignung von FKV-Werkstoffen als Auflagermaterial

Neben den Auswahlmöglichkeiten hinsichtlich des zu verwendenden Materials müssen experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden, mithilfe derer es möglich ist, sowohl den Fertigungsprozess qualitativ zu untersuchen, als auch zu ermitteln, ob die Materialentwicklung den definierten Anforderungen genügen. Die für eine Qualifikation des Werkstoffs in Frage kommenden Versuche sowie der Bedarf für die Durchführung dieser sind in Tabelle 15 und Tabelle 16 beschrieben. Die Untersuchungen werden nach ihrer Art gegliedert in

- mechanische Untersuchungen und
- die Bestimmung physikalischer Kennwerte.

Tabelle 15: Übersicht der durchzuführenden Versuche zur Bestimmung mechanischer Kennwerte

Anforderungen	Versuche zur Bestimmung mechanischer Kennwerte		
	Experimenteller Versuch	Normung	Ermittelte Kennwerte/Eigenschaften
Statische Beanspruchung der Auflagerwerkstoffe durch das Tankgewicht und Spitzenlasten durch Wellenschlag	Bestimmung der Druckfestigkeit	DIN EN ISO 604 ISO 3597-3	Druckfestigkeit σ_D Stauchung ϵ E-Modul E
Beanspruchung der Auflagerwerkstoffe durch Quer- und Längsbelastungen in den Festlagern	Bestimmung der Scherfestigkeit	ASTM D 5379	Scherfestigkeit τ
Dauerhafte dynamische Belastung der Auflagerwerkstoffe durch das Tankgewicht und Wellenschlag	Ermittlung der Betriebsfestigkeit	DIN 50100	Dauerfestigkeit, Abschätzung der Überlebenswahrscheinlichkeit bei zyklischer Belastung Ermittlung von Abminderungsfaktoren durch dynamische Belastungen
Dauerhafte statische Belastung durch das Tankgewicht	Ermittlung der statischen Dauerdrukfestigkeit	In Anlehnung DIN EN ISO 899-1/2	Ermittlung der Werkstoffverschiebungen
Starke Temperaturwechsel durch Auf- und Abkühlvorgänge sowie dauerhafte Belastung des Lagers durch tiefkaltes LNG bei -163 °C	Bestimmung der Druckfestigkeit nach medialer Belastung und unter medialer Belastung	DIN EN ISO 604 ISO 3597-3	Druckfestigkeit σ_D Stauchung ϵ E-Modul E Alle Kennwerte für das Verhalten des Werkstoffs unter medialer Belastung
	Durchführung einer dynamisch-mechanischen Analyse (DMA)	-	Bestimmung des Glasübergangspunktes T_g und mechanische Werkstoffcharakterisierung unter variierenden Temperaturen (E' , E'')
	Ermittlung des Wärmeausdehnungskoeffizienten	DIN 53752	Bestimmung der Materialausdehnung unter Temperatureinfluss Wärmeausdehnungskoeffizient α

Tabelle 16: Übersicht der durchzuführenden Versuche zur Bestimmung physikalischer Kennwerte

Anforderungen	Versuche zur Bestimmung physikalischer Kennwerte		
	Experimenteller Versuch	Normung	Ermittelte Kennwerte/Eigenschaften
vollständige Füllung der Kavität eines Auflagerblocks	Durchführung rheologischer Untersuchungen	-	Topfzeiten zur Bestimmung der Verarbeitungs- und Aushärteeigenschaften (δ)
Vermeidung einer Überhitzung des Matrixwerkstoffs in der Kavität	Dynamische Differenz Kalorimetrie (DSC)	-	Bestimmung der Energiefreisetzung bei der exothermen Reaktion während der Aushärtung
Bestimmung der Effektivität einer Materialtemperung			Ermittlung des Glasübergangspunkts T_g
Gewährleistung einer reproduzierbaren Werkstoff-zusammensetzung	Bestimmung des Faser-volumengehalts FVG - φ	DIN EN ISO 1172	Ermittlung des Anteils an Glasfasern und Füllstoffen im FKV-Werkstoff
Breitstellung von Kennwerten für die analytische Modellbildung			
Thermische Isolierung	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	DIN EN ISO 22007 DIN EN 12667	Wärmeleitfähigkeit λ
Beständigkeit des Auflagerwerkstoffs gegen Feuchtigkeit	Bestimmung der Wasseraufnahme	DIN EN ISO 62	Ermittlung des Quellverhaltens Bestimmung der Wassermenge bis zur Sättigung
Gewichtsreduktion	Bestimmung von Materialdichten	-	Ermittlung der Materialdichten von gefüllten und ungefüllten EP-Matrixsystemen

5.3 Zusammenfassung der Nutzung von FKV-Werkstoffen

Die Ergebnisse der theoretischen Überlegungen sind nachfolgend in Abbildung 30 dargestellt. Die hier getroffenen Festlegungen werden im anschließenden Untersuchungskomplex erprobt.

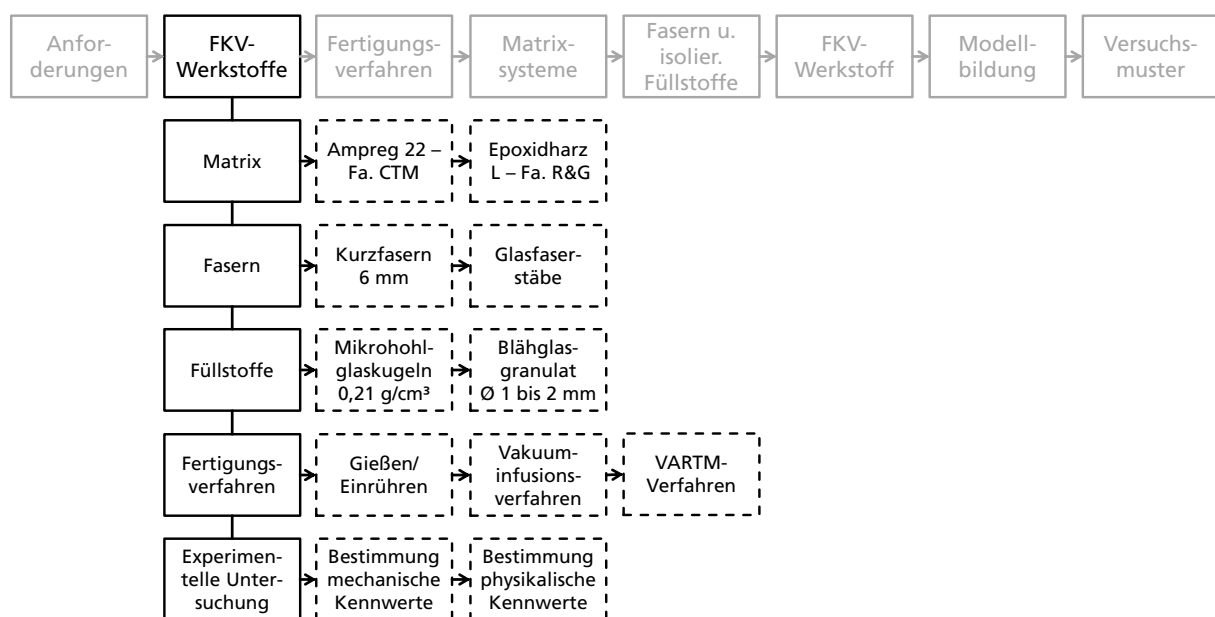


Abbildung 30: Zusammenfassung der Nutzung von FKV-Werkstoffen

6 Entwicklung eines FKV-Auflagersystems

Nachfolgend steht der experimentelle Teil der Arbeit für die Verifizierung der zuvor getroffenen Annahmen. Es werden die folgenden in Abbildung 31 dargestellten Entwicklungsschritte einzeln durchlaufen. Zur Vereinfachung wird die folgende Gliederung der Grafik um die theoretischen Überlegungen gekürzt.

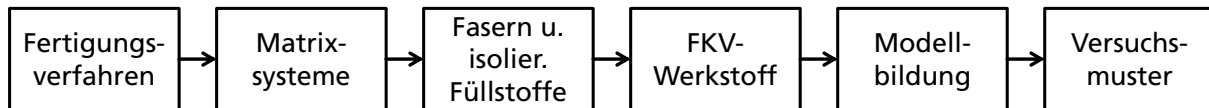


Abbildung 31: Experimentelle Entwicklungsschritte zur Entwicklung eines FKV-Werkstoffs

6.1 Erprobung von Fertigungsverfahren

Begonnen werden die Untersuchungen zur Ermittlung der Eignung von FKV als Auflagerwerkstoff mit der Betrachtung unterschiedlicher Fertigungsverfahren. Die zu untersuchenden Fertigungsverfahren teilen sich in die in Abbildung 32 dargestellten Verfahren auf. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt in der Ermittlung der Eigenschaften zur Verarbeitung der eingesetzten Füllstoffe im Hinblick auf eine reproduzierbare Fertigung.

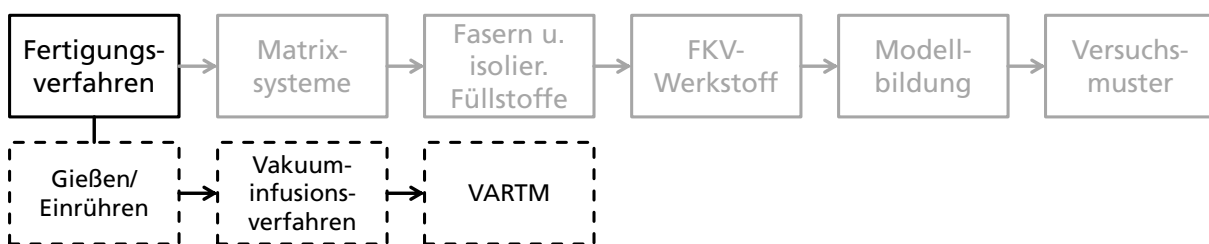


Abbildung 32: Übersicht der zu untersuchenden Fertigungsverfahren

6.1.1 Gießverfahren/Eintrühren

Zuerst wird, auf Grund der einfachen Umsetzung, das Gießverfahren für die Herstellung von Auflagerblöcken erprobt. Die Grundlagen dafür sind bereits in [35] dargestellt und sollen hier der Vollständigkeit halber nur kurz aufgeführt werden. Es werden zwei Arten des Verfahrens untersucht.

Es werden Versuche im Gießverfahren durchgeführt. Dazu wird eine flüssige, reaktive Matrix nach dem Mischvorgang in eine Form gegossen. Die Aushärtung des flüssigen Matrixgemischs findet ohne weitere Arbeitsschritte in der offenen Kavität statt. Wird auf eine Zugabe von Füllstoffen verzichtet, ist dieses Verfahren mit einfachen Mitteln gut durchführbar. Es entstehen Probekörper mit glatten Oberflächeneigenschaften, die einzig zum Rand der offenen Kavität leichte Wölbungen zeigen, so dass eine Nachbearbeitung an diesen Stellen durch ein Besäumen der Kanten notwendig wird. Luft einschließen oder andere Fehlstellen sind durch ein gleichmäßiges Gießen und Verteilen des flüssigen Matrixwerkstoffs im händischen Prozess vermeidbar.

Wenn Füllstoffe zum Einsatz kommen, werden diese nach dem Mischen der Harz- und Härterkomponenten der flüssigen, reaktiven Matrix händisch oder maschinell beigemischt. Die

Menge der Füllstoffe ist durch einen Anstieg der Viskosität und damit einem erschwerten Vermischungsprozess begrenzt. Durch die stark steigende Viskosität ist ein Einfüllen der flüssigen und verstärkten Matrix in eine offene Kavität erschwert. Um Hohlräume und Fehlstellen zu vermeiden, ist auf einen langsam durchzuführenden Einfüllvorgang zu achten. Bei großflächigen Platten kann eine Herstellung ohne Fehlstellen gewährleistet werden. Dagegen ist aufgrund der hohen Viskositäten eine Füllung komplexerer Strukturen, bspw. zur Herstellung von Probekörpern, nicht immer ohne die Entstehung von Fehlstellen möglich.

Die Probenherstellung mit diesem Verfahren lässt eine Herstellung mit den in Tabelle 17 dargestellten Füllstoffgehaltmengen zu. Das Verfahren wird mit 2 Epoxidharzen erprobt.

Tabelle 17: Probenzusammensetzung im Gießverfahren

Probenbezeichnung	thermisch isolierende Füllstoffe 1	Max. Vol. [%] Gehalt	festigkeitssteigernde Füllstoffe 2	Max. Vol. [%] Gehalt
Epoxidharz mit Mikrohohlglaskugeln	Mikrohohlglaskugeln (0,21 g/cm ³)	70 %	-	-
Epoxidharz mit Kurzglasfasern	-		Kurzglasfaser (6 mm)	50 %
Hybridproben	Mikrohohlglaskugeln (0,21 g/cm ³)	10 %	Kurzglasfaser (6 mm)	20 %

Bei der Probenherstellung treten die folgenden Fehler auf:

- Aufschwimmen der Mikrohohlglaskugeln bei alleinigem Einrühren der Kugeln bis 30 Vol. [%] nach Einrührvorgang und Entstehen von Inhomogenität der Probekörper
- Entstehen von Lufteinschlüssen bei Fasergehalten > 20 Vol. [%]
- Starker Anstieg der Viskosität und Verschlechterung der Einfüllbarkeit in Probenform

Die aufgetretenen Fehler sind nachfolgend in Abbildung 33 dargestellt.

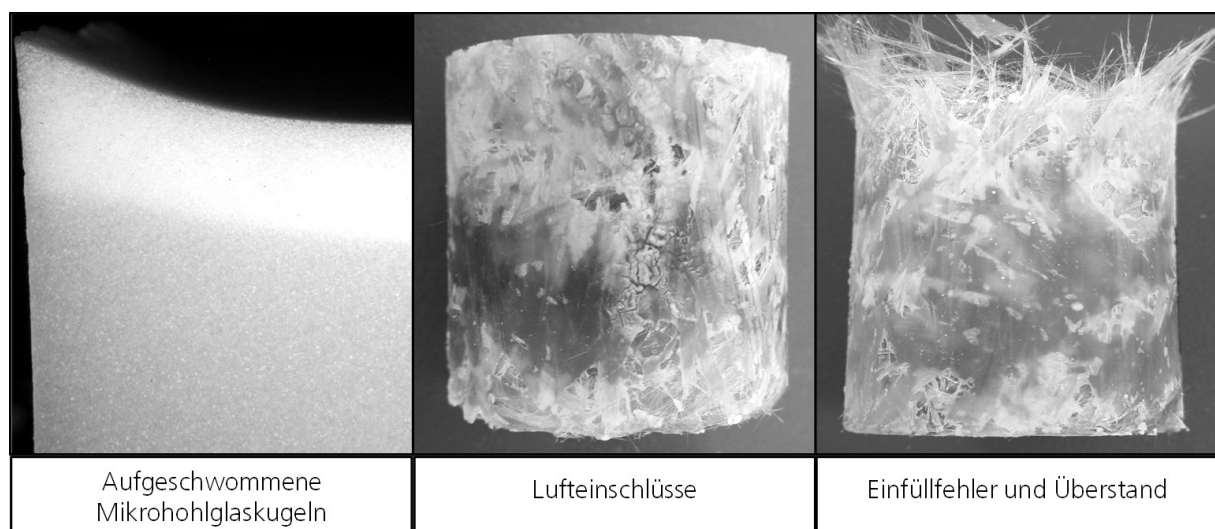


Abbildung 33: Auftretende Fehlfunktionen beim Gießverfahren/Einrühren

Auf Grund der Erfahrungen aus den Laborversuchen und den dabei aufgetretenen Schwierigkeiten bei der Verarbeitung mit Füllstoffen verstärkter Epoxidharze, wird das Verfahren ausschließlich für die Herstellung von Proben mit Kurzfasern und Mikrohohlglaskugeln genutzt.

Später wird dies durch ein zur reproduzierbaren Herstellung von Probekörpern und Versuchsmustern besser geeignetes Verfahren ersetzt. Die Nutzung unterschiedlicher Epoxidharzsysteme hat keinen Einfluss auf die Herstellung von Probekörpern mit diesem Verfahren.

Tabelle 18: Ergebnisse Fertigungsverfahren Gießen/Einrühren

Verfahren	Harzsystem	Füllstoffe	Ergebnisse
Gießverfahren/ Einrühren	Epoxidharz L/ Härter EPH 161 Ampreg 22	Mikrohohlglaskugeln (0,21 g/cm ³)	Bei geringen Füllstoffvolumen geeignet Bei größeren Füllstoffvolumen auftretende Probleme: <ul style="list-style-type: none"> • Entmischungen • Lufteinschlüsse • Aufschwimmen
		Kurzfasern (6 mm)	
		Kombination aus Mikrohohlglaskugeln und Kurzfasern (6 mm)	

6.1.2 Vakuuminfusionsverfahren

Zur Steigerung der reproduzierbaren Qualität bei der Probenherstellung wird weiterführend das Verfahren der Vakuuminfusion untersucht. Dabei werden Versuche mit Mikrohohlglaskugeln und Kurzfasern sowie Glasfaserstäben und Blähglasgranulat durchgeführt. Zur Herstellung wird eine kreisrunde Kavität mit endkonturnahen Probenabmaßen gewählt. Die durchgeführten Versuche zur Erprobung des Fertigungsverfahrens unterteilen sich in Versuche mit Mikrohohlglaskugeln/Kurzfasern sowie Versuche mit Glasfaserstäben/Blähglasgranulat. Diese unterscheiden sich in der Fertigung hinsichtlich des Einfüllvorgangs der Füllstoffe.

6.1.2.1 Vakuuminfusionsverfahren für Proben mit ungerichteten Füllstoffen

Die Probenherstellung für Proben mit ungerichteten Füllstoffen im Vakuuminfusionsverfahren lässt eine Herstellung von Proben mit folgenden in Tabelle 19 dargestellten Füllstoffgehaltmengen zu:

Tabelle 19: Probenzusammensetzung im Vakuuminfusionsverfahren

Probenbezeichnung	thermisch isolierende Füllstoffe 1	Max. Vol. [%] Gehalt	festigkeitssteigernde Füllstoffe 2	Max. Vol. [%] Gehalt
Epoxidharz mit Mikrohohlglaskugeln	Mikrohohlglaskugeln (0,21 g/cm ³)	30 %	-	-
Epoxidharz mit Kurzglasfasern	-	-	Kurzglasfaser (6 mm)	30 %
Hybridproben	Mikrohohlglaskugeln (0,21 g/cm ³)	20 %	Kurzglasfaser (6 mm)	30 %
Hybridproben	Mikrohohlglaskugeln (0,21 g/cm ³)	30 %	Kurzglasfaser (6 mm)	20 %

Die Mikrohohlglaskugeln und Fasern werden vor dem Einfüllen in die Kavität trocken miteinander vermischt. Anschließend wird das Gemisch in die Kavität gefüllt, die Kavität verschlossen sowie anschließend luftevakuiert. Im Imprägniervorgang werden die Füllstoffe mithilfe des flüssigen, reaktiven Epoxidharzes getränkt. Auf Grund der langen Topfzeit des Harzes verbleibt die Probe ca. 24h in der Form, bevor eine Entformung stattfinden kann. Anschließend werden die Ober- und Unterseite der Proben durch einen Sägeschnitt zur

Erzielung planer Oberflächen bearbeitet. Ein anschließendes Tempern, entsprechend der Vorgaben [55], garantiert eine maximal erreichbare Vernetzung des Harzes, bevor die Probe auf ihre Eigenschaften untersucht werden kann. Das grundlegende Fertigungsprinzip im Vakuumverfahren ist in Abbildung 34 dargestellt.

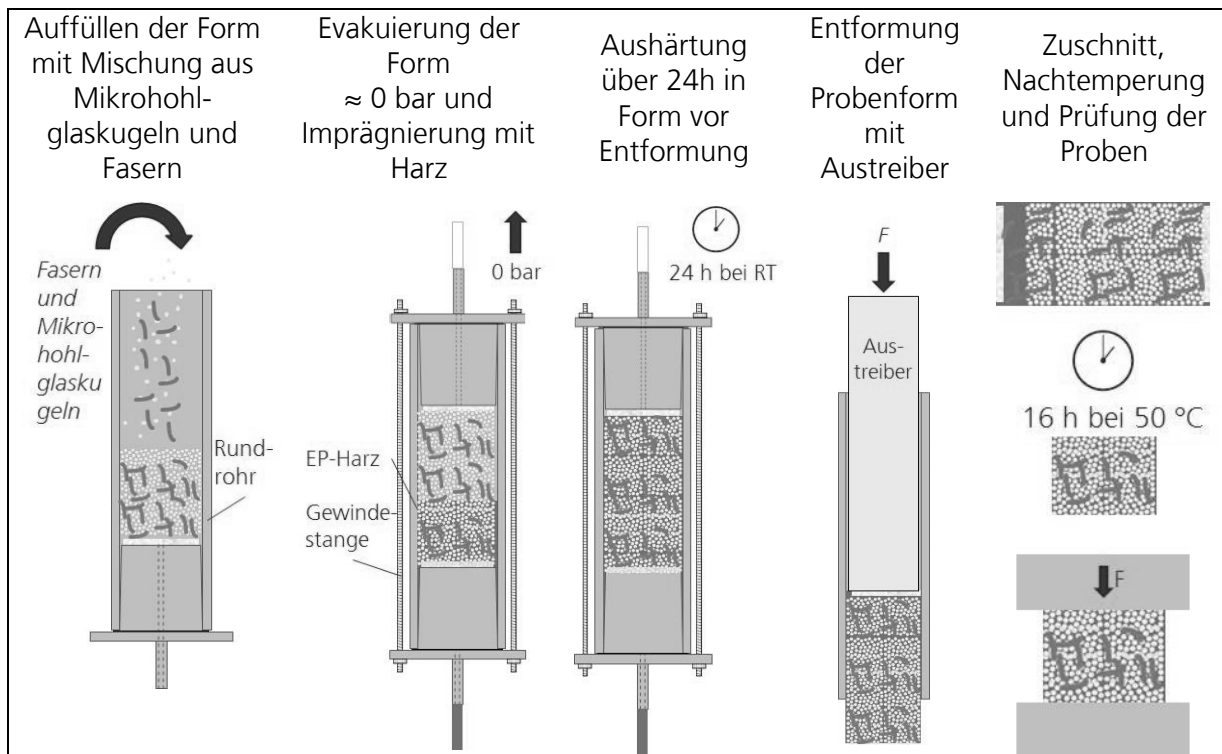


Abbildung 34: Schematische Darstellung der Fertigung von Probekörpern im Vakuuminfusionsverfahren und Fließfrontdarstellung [75]

Probleme treten bei diesem Verfahren insbesondere durch ein Austreten bzw. Wegschwimmen der Mikrohohlglaskugeln auf. Das Austreten der Kugeln kann durch ein Versperren des Abgusses mithilfe eines harzdurchlässigen Vlieses vermieden werden. Ein Wegschwimmen der Kugeln erzeugt in bestimmten Probenbereichen eine Agglomeration der Füllstoffe und kann nicht verhindert werden (vgl. Abbildung 33). Dies wird durch den fertigungsbedingten starken Harzstrom in der Kavität verursacht. Eine Reduktion des Harzstroms durch einen erhöhten Luftdruck in der Kavität führt nicht zu den gewünschten Ergebnissen, so dass eine reine Nutzung von Mikrohohlglaskugeln im Vakuuminfusionsverfahren ausgeschlossen werden muss.

Weiterhin werden Versuche mit Kurzfasern durchgeführt. Diese ergeben, dass durch die hohen Harzfließgeschwindigkeiten eine Kompression der Fasern und damit eine Agglomeration der Füllstoffe in den Proben eintreten. Weiterhin orientieren sich die Fasern durch die Kompression quer zur Fließrichtung, wodurch die eigentliche Funktion der Fasern als Verstärkungsfasern mit vertikaler Ausrichtung zur Belastungsrichtung nicht mehr gewährleistet wird. Die Kombination von Fasern und Mikrohohlglaskugeln führt in diesem Verfahren zu starken Agglomerationen in den Probekörpern. Dabei wirken die Fasern wie Barrieren an denen sich die Mikrohohlglaskugeln sammeln können. Damit ist eine homogene Verteilung der Füllstoffe im Probekörper ausgeschlossen. Nachfolgend sind die auftretenden Fehlstellen durch Agglomerationen und Faserausrichtungen dargestellt.

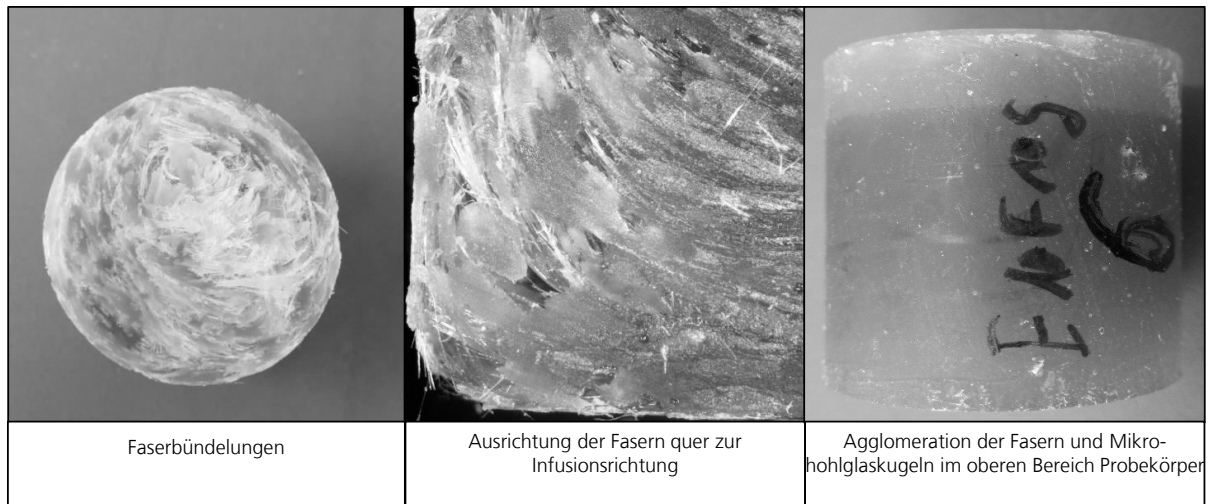


Abbildung 35: Fehlstellen im Fertigungsverfahren Vakuuminfusion mit Kurzfasern und Mikrohohlglaskugeln

6.1.2.2 Vakuuminfusionsverfahren für Proben mit gerichteten Füllstoffen

Zur Herstellung von Proben mit Glasfaserstäben und Blähglasgranulat wird das in Abbildung 36 dargestellte Vorgehen genutzt.

Zuerst werden die Glasfaserstäbe auf die entsprechende Länge der Kavität zugeschnitten. Die Stäbe werden anschließend mit einer Lochschablone in den entsprechend gewählten Abständen positioniert und daraufhin in die Kavität gestellt. Danach wird die Kavität gedreht, so dass die Lochschablone am unteren Ende dieser ist und ein Einfüllen des Blähglasgranulats von oben in die Kavität vorgenommen werden kann. Der obere Deckel wird geschlossen und die Kavität gedreht, so dass die Lochplatte entfernt werden kann. Die Glasfaserstäbe werden durch das Blähglasgranulat gestützt. Der verbleibende Hohlraum wird anschließend mit Blähglasgranulat aufgefüllt, so dass eine vollständige Füllung der Form gewährleistet ist und die Kavität für den Fertigungsprozess verschlossen wird. Anschließend wird eine Imprägnierung des Blähglasgranulats sowie der Glasfaserstäbe mit dem Vakuuminfusionsverfahren durchgeführt. Der Probekörper verbleibt auf Grund der langen Topfzeit des Harzes ca. 24h in der Form, bevor eine Entformung stattfindet. Anschließend werden die Ober- und Unterseite der Proben zur Erzielung planer Oberflächen abgesägt. Ein anschließendes Tempern, entsprechend der Vorgaben [55] garantiert eine vollständige Vernetzung des Harzes bevor die Probe auf ihre Eigenschaften untersucht werden kann.

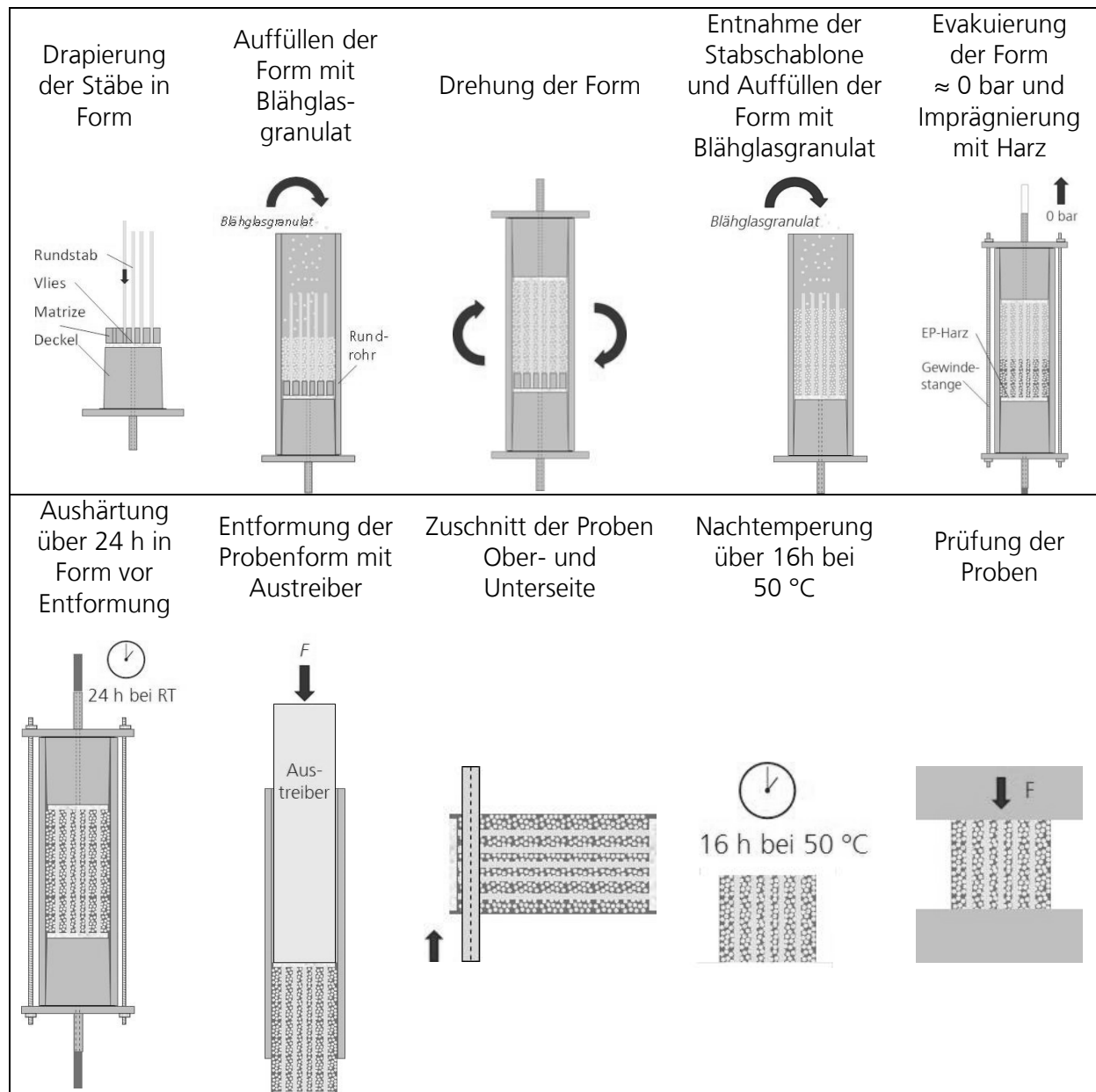


Abbildung 36: Schematische Darstellung der Fertigung von Probekörpern mit Glasfaserstäben und Blähglasgranulaten [75]

Probleme entstehen, bedingt durch den Harzstrom in der Kavität, bei diesem Verfahren ebenfalls durch ein Ausschwemmen des Blähglasgranulats während des Infusionsprozesses. Dies kann durch die Nutzung eines Vlieses verhindert werden. Agglomerationen oder Lufteinschlüsse treten bei diesem Verfahren nicht auf, so dass eine Probenherstellung mit reproduzierbar gleichen Ergebnissen gewährleistet werden kann (vgl. Tabelle 20). Einzig die sehr hohe Füllung der Kavität mit Kugeln, die zu einem langsamen Fließfrontverlauf des Harzes führt, verlangsamt das Befüllen und die Benetzung der Füllstoffe in dieser, so dass es vereinzelt an den Probenrändern zu „trockenen“, nicht getränkten Stellen kommt.

Tabelle 20: Ergebnisse Fertigungsverfahren Vakuuminfusionsverfahren

Verfahren	Harzsystem	Füllstoffe	Ergebnisse
Vakuuminfusion	Epoxidharz L/ Härter EPH 161 Ampreg 22	Mikrohohlglaskugeln	<ul style="list-style-type: none"> Ausschwimmen Mikrohohlglaskugeln und Blähglasgranulat Agglomeration und Bündelung Fasern Behinderung der Fließfront durch Faserbündelungen Reproduzierbare Ergebnisse bei Glasfaserstäben und Blähglasgranulat
		Kurzfasern (6 mm)	
		Kombination aus Mikrohohlglaskugeln und Kurzfasern (6 mm)	
		Kombination aus Glasfaserstäben und Blähglasgranulat	

6.1.3 Vakuuminfusionsverfahren mit RTM

Zur Verhinderung von trockenen Stellen sowie zur Reduktion der Imprägnierzeit werden Versuche mithilfe des Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding Verfahrens (VARTM) durchgeführt. Diese werden sowohl mit Fasern als Füllstoff als auch mit Glasfaserstäben und Blähglasgranulaten durchgeführt. Bei den Versuchen mit Kurzfasern wird die Kavität vollständig mit Fasern gefüllt und unter Druck geschlossen. Dennoch treten im Versuch Agglomerationen der Fasern auf. Mit der Infusionsrichtung steigt, wie in Abbildung 37 dargestellt, der Faservolumengehalt, so dass bei der Füllstoffverteilung Inhomogenitäten entstehen.

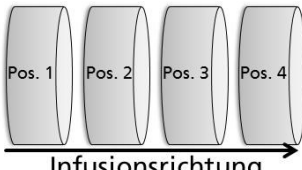
	Position	Faservolumengehalt
	Pos. 1	59,2 Vol. [%]
	Pos. 2	55,5 Vol. [%]
	Pos. 3	48,7 Vol. [%]
	Pos. 4	39,5 Vol. [%]

Abbildung 37: Erhöhung des Faservolumengehalts mit Infusionsrichtung

Hohlräume und Lufteinschlüsse hingegen können mit diesem Verfahren verhindert werden. Auf Grund der auftretenden Inhomogenitäten in den Versuchen, wird eine Bestimmung maximaler Füllstoffgehalte mit unterschiedlichen Füllstoffen nicht durchgeführt. Die Versuche mit Glasfaserstäben und Blähglasgranulaten zeigen bei der Probenherstellung keine Fehlstellen oder -funktionen, so dass hier von einem reproduzierbaren Fertigungsverfahren für diese Füllstoffkombination ausgegangen werden kann (vgl. Tabelle 21).

Tabelle 21: Ergebnisse Fertigungsverfahren VARTM-Verfahren

Verfahren	Harzsystem	Füllstoffe	Ergebnisse
VARTM	Ampreg 22	Kurzfasern (6 mm) Kombination aus Glasfaserstäben und Blähglasgranulat	<ul style="list-style-type: none"> Keine Hohlräume, Einschlüsse oder trockene Stellen Agglomeration und Bündelung Fasern Reproduzierbare Ergebnisse bei Glasfaserstäben und Blähglasgranulat

6.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Fertigungsversuchen

Die Untersuchungen der Erprobung unterschiedlicher Fertigungsverfahren haben als Ergebnis, dass die Fertigungsverfahren der Vakuuminfusion und das VARTM-Verfahren geeignet für die Herstellung von modifizierten Epoxidharzsystemen sind. Mit diesen beiden Verfahren können reproduzierbar Glasfaserstäbe und Blähglasgranulat als Füllstoffe in eine Epoxidharzmatrix eingebracht werden. Durch die auftretenden fertigungsbedingten Fehler bei der Nutzung von Kurzglasfasern und Mikrohohlglaskugeln werden diese Füllstoffe nicht weiter als Optionen betrachtet. Alle weiteren Arbeitsschritte konzentrieren sich ausschließlich auf die Nutzung von Glasfaserstäben und Blähglasgranulat (vgl. Abbildung 38).

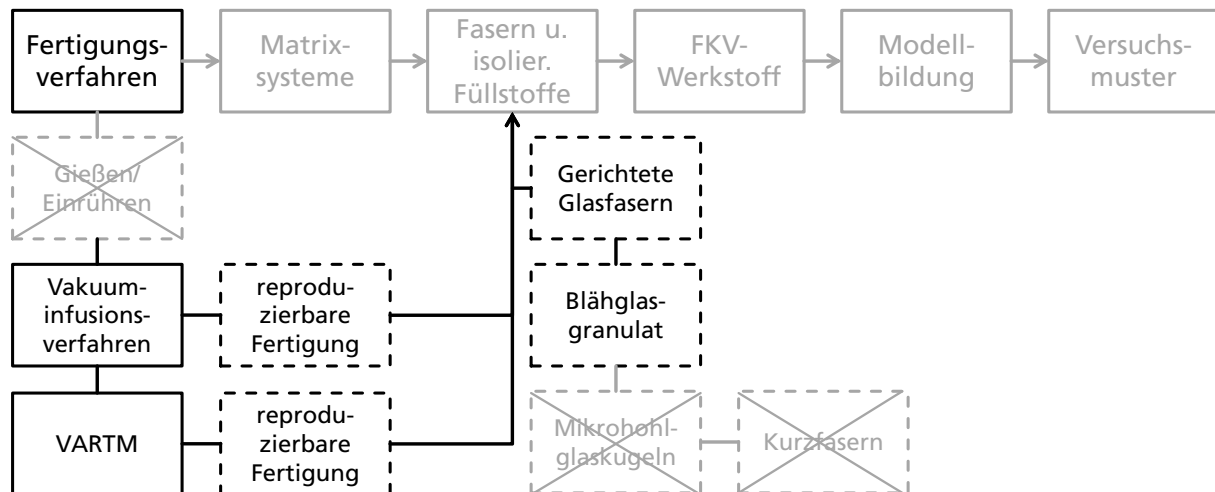


Abbildung 38 : Ergebnisse der Erprobung der Fertigungsverfahren

6.2 Qualifizierung eines Matrixsystems

Zur Qualifizierung der Eigenschaften des Harzsystems und zur Ableitung der Verarbeitungseigenschaften werden die in der Abbildung 39 aufgelisteten Versuche durchgeführt. Die in diesem Kapitel durchgeführten Untersuchungen beschränken sich ausschließlich auf das Harzsystem Ampreg 22 [55] und die dafür erhältlichen Härtersysteme, da die Fertigungsversuche eine Nutzung dieses Systems als aussichtsreichste Variante darstellen. Die Versuche sollen die Datenlage zu dem Matrixsystem vervollständigen. Grundsätzlich lassen sich auch andere EP-Matrixsysteme mit ähnlichen Eigenschaften wie das Ampreg System für eine Herstellung von Auflagerblöcken nutzen. Bei den Härtersystemen werden die Härter „Fast“, „Standard“ und „Slow“ als mögliche Systeme untersucht. Das EP-Matrixsystem aus Epoxidharz L und dem Härter EPH 161 wird auf Grund der fehlenden maritimen Zulassung nicht weiter betrachtet.

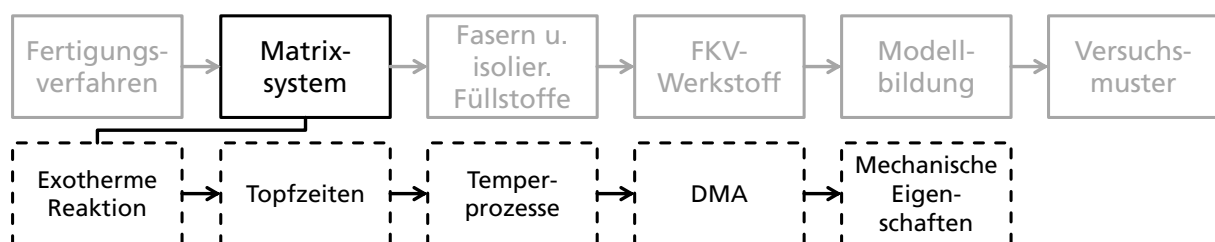


Abbildung 39: Übersicht der experimentellen Untersuchungen an EP-Matrixsystemen

6.2.1 Untersuchung der exothermen Reaktion mit der dynamischen Differenz Kalorimetrie (DSC) - Energiefreisetzung

Begonnen werden die Versuche mit der Untersuchung der exothermen Reaktion bei der Aushärtung des reaktiven Harz-Härter-Gemisches. Die exothermen Reaktionen können bei reaktiven Harzsystemen in der praktischen Anwendung nur sehr schwer kontrolliert werden. Sie sind gekennzeichnet durch einen starken Temperaturanstieg während des Reaktionsprozesses und müssen durch geeignete Kühlungen abgemindert werden [19]. Bei der Nutzung großer Harzmengen, kleinen Oberflächenvolumen und einem dabei entstehenden Wärmestau in der Kavität kann die exotherme Reaktion zu einem verfrühten Beginn der Aushärtung bzw. zu einem Verbrennen des Harzsystems führen. Daher müssen Untersuchungen zur entstehenden Wärme durch die exotherme Reaktion durchgeführt werden. Die Untersuchungen ermöglichen eine Dimensionierung der Kühlung für einen Versuchsmustertest. Ziel ist es, eine verfrühte Aushärtung bzw. Verbrennung des EP-Matrixsystems zu vermeiden und die entstehende exotherme Reaktion kontrollierbarer zu machen. Es soll ebenfalls untersucht werden, ob die Reaktionszeit der Härtersysteme einen Einfluss auf die entstehende Energie hat.

Die Versuche dazu werden auf einem DSC-Gerät durch Ermittlung der Energiefreisetzungsrates durchgeführt. Dazu wird eine definierte Menge von flüssigem Harz-Härter-Gemisch ($< 0,1$ g) in einen Probentiegel gegeben. Anschließend wird, bei einer Heizrate von 10 K/min eine Temperaturkurve von -20 °C bis $+200$ °C, bis zu einer vollständigen Aushärtung durchfahren. Dabei wird die entstehende Energie gemessen. Die Versuche werden an zwei Härtersystemen, die für das Harz Ampreg 22 am Markt verfügbar sind, durchgeführt. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Topfzeiten und werden als Fast und Slow bezeichnet.

In Abbildung 40 sind die Ergebnisse der entstehenden Energie bei der exothermen Reaktion des Harzes mit unterschiedlichen Härtersystemen dargestellt.

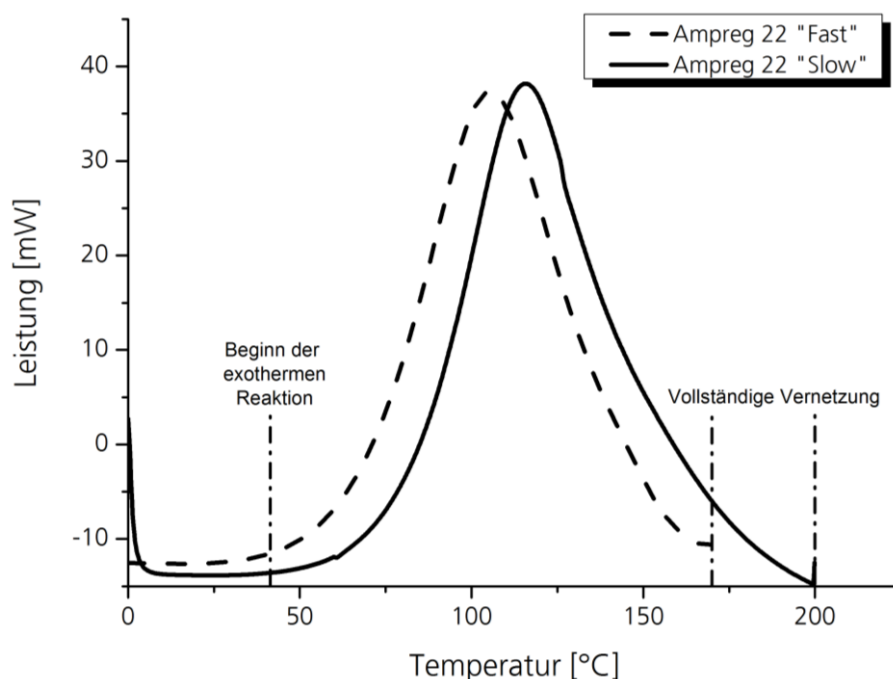


Abbildung 40: Ergebnisse der Bestimmung der durch die exotherme Reaktion entstehenden Wärme im Matrixsystem

Die Ergebnisse werden nach ASTM D 3418 ausgewertet. Dazu wird eine Basislinie zwischen den Anfangs- und Endpunkt der exothermen Reaktion gelegt. Die anschließend dadurch entstehende Fläche gibt durch eine Integration Auskunft über die entstandene Energiemenge unter dem Peak in J/g [76]. Die Ergebnisse des Versuchs zeigen in Tabelle 22 bei dem schnellen Härter „Fast“ und dem langsamen Härter „Slow“ ähnliche Ergebnisse.

Tabelle 22: Ergebnisse der kalorimetrischen Untersuchungen zur Aushärtereaktion des Harzsystem Ampreg 22 mit zwei unterschiedlichen Härtern

	Gesamtenergie	Gewicht Probe	Spezifische Energie
	[mJ]	[mg]	[J/g]
Ampreg 22 „Fast“	7517	20,36	369
Ampreg 22 „Slow“	7790	20,38	382

Bei dem Härtersystem „Fast“ kann eine Energiemenge von 369 J/g und für das Härtersystem „Slow“ eine Energiemenge von 382 J/g ermittelt werden. Damit hat das Härtersystem bei einer vollständigen Aushärtung keinen Einfluss auf die entstehende Energiemenge.

Bei den hier durchgeführten Versuchen wird eine schnelle Heizrate von 10 K/min gewählt, die zu einer zusätzlichen Beschleunigung der exothermen Reaktion führen kann. Die im Rahmen dieser Untersuchung ermittelten Werte können bei der Versuchsmusterherstellung für die Dimensionierung der Kühlung der Form genutzt werden. Bei dieser praktischen Anwendung verläuft die Reaktion bei Raumtemperatur oder niedrigeren Temperaturen und damit sehr viel langsamer als bei den Messversuchen. Dadurch kann die exotherme Reaktion besser kontrolliert und eingedämmt werden.

6.2.2 Bestimmung der Topfzeiten unter Raumtemperatur und variierenden Temperaturen mithilfe rheologischer Untersuchungen

Entscheidend für eine reproduzierbare Fertigung von Auflagerblöcken aus FKV-Werkstoffen ist eine vollständige Füllung der Kavität mit dem Harz-Härter-Gemisch. Die Füllung muss vor dem Einsetzen einer Gelierung des Harz-Härter-Systems erfolgen. Um dies zu gewährleisten, muss ein Harz-Härter-System mit einer ausreichenden Topfzeit gewählt werden. Zudem muss es vor einer Anwendung auf seine Aushärteeigenschaften hin qualifiziert werden. Die Aushärteeigenschaften eines Harzsystems lassen sich durch rheologische Untersuchungen bspw. mit einem Rheometer definieren. Bestimmt werden können damit bspw. die Topf- und Verarbeitungszeiten. Durch eine oszillierende Scherung des Harzsystems werden die Kennwerte der Viskosität η , des Speicher- G' ⁸ und des Verlustmoduls G'' ⁹ ermittelt (vgl. Abbildung 41). Dabei ist die Topfzeit die Zeit, bei der keine Viskositätsänderung in der Messung festgestellt werden kann. Die Verarbeitungszeit ist die Zeit, bei der eine definierte Viskosität erreicht wird, bevor es zu einem Gelierprozess (Erreichung des Sol-/Gelpunkts) und damit einer Abnahme der Fließfähigkeit kommt [77 bis 79]. Nachfolgend wird zur Gewährleistung der wissenschaftlichen Vergleichbarkeit die Topfzeit bestimmt. Ausgehend vom Speicher- und Verlustmodul wird zur

⁸ Der Speichermodul beschreibt den elastischen Anteil des komplexen Schubmoduls und verhält sich proportional zu dem Anteil der in einen Körper eingebrachten Deformationsenergie. Der Energieanteil des Speichermoduls wird nach der Deformationsentlastung eines Körpers wieder vollständig abgegeben.

⁹ Der Verlustmodul beschreibt den viskosen Anteil des komplexen Schubmoduls. Dieser geht bei einer Energieeinbringung in einen Körper durch innere Reibung und in Form von Wärme verloren.

vergleichenden Darstellung unterschiedlicher Harz-Härter-Systeme nach Formel 17 der Phasenverschiebungswinkel δ bestimmt.

Formel 17: Bestimmung des Phasenverlustwinkels

$$\tan \delta_V = \frac{G''}{G'}$$

G' : Speichermodul
 G'' : Verlustmodul

Der Phasenverschiebungswinkel δ stellt beim Erreichen von 45° den Schnittpunkt zwischen Verlust- und Speichermodul dar. Ab diesem Zeitpunkt wird der Sol-/Gelpunkt erreicht und eine Verarbeitung des reaktiven Harz-Härter-Gemischs ist nicht mehr möglich. Die Versuche dazu werden nach der Norm DIN 54458 auf einem Gerät der Firma Thermo Fisher Scientific (Typ: HAAKE MARS III) durchgeführt [80]. Dazu wird eine reaktive Menge des EP-Matrixsystems (0,4 ml) mit einer scherverformungsgeregelten Torsionsschwingung in einem Platte-Platte System angeregt. Die Scherverformung beträgt 0,5 % und die Spalthöhe 1 mm. Um eine scherratenabhängige Viskositätsmessung zu vermeiden, wird durch einen Frequenzsweep der linear-viskoelastische Bereich (LVE-Bereich) bestimmt. Das Ergebnis dieses Sweeps ist, dass die Messung bei einer Frequenz von 1 Hz durchgeführt werden kann. Bis zu dieser tritt keine Schädigung der Strukturviskosität des EP-Matrixsystems ein. Die nach [77] gestellte Anforderung kann eingehalten werden.

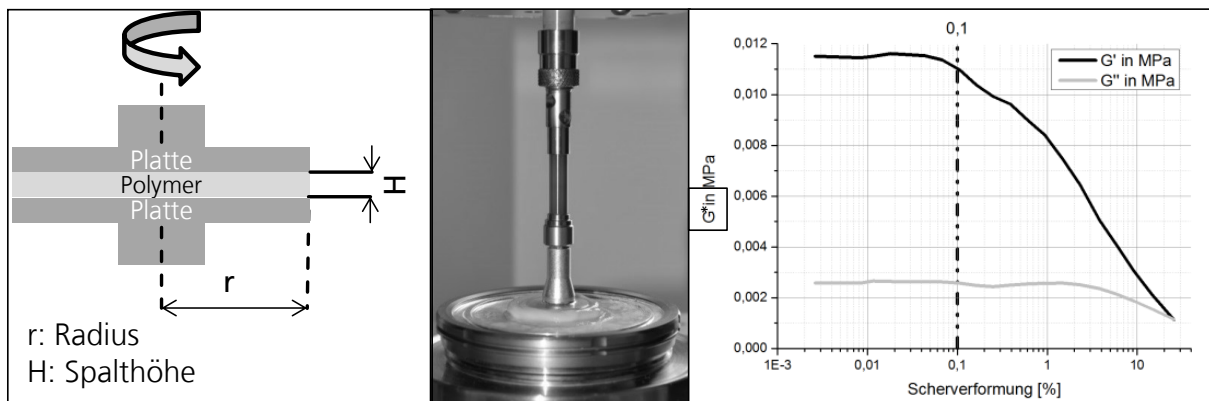


Abbildung 41: Messaufbau, exemplarische Prüfung und Bestimmung des LVE-Bereichs (re.)

Die Prüfparameter der rheologischen Untersuchungen sind in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Prüfparameter der Untersuchungen mit einem Rheometer

Viskositätsmessung und Aushärteeigenschaften	
Parameter	Bezeichnung/Wert
Norm	DIN 54458
Prüfmaschine	HAAKE MARS III (Fa. Thermo Fisher)
Messung	Platte-Platte mit D = 20 mm
Scherverformung	0,5 %
Frequenz	1 Hz
Spaltabstand	1 mm

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Bestimmung der Topf-/Verarbeitungszeiten sind in Abbildung 42 für die drei Härterssysteme (Fast, Standard, Slow) bei einer Temperatur von 23°C

und für das Härtersystem „Slow“ bei den Temperaturen 5 °C, 23 °C und 45 °C dargestellt. Der Prüfaufbau mit einem Kühl-/Heizelement als unteres Plattenmodul verhindert, das aus der Praxis bekannte, exponentielle Ansteigen der Wärme beim Start einer exothermen Reaktion. Das Temperiermodul und die geringe Harzmenge von 0,4 ml verzögern die Aushärtereaktion signifikant und es können sehr viel längere Topfzeiten (drei- bis fünfmal höher als in der Praxis) gemessen werden. Daher ist dieses Verfahren vor allem für eine untereinander vergleichende Analyse von Harzsystemen geeignet ohne dabei einen direkten quantitativen Rückschluss auf die Praxis zuzulassen. Grundsätzlich zeigt sich das aus der Literatur für Duromere bekannte Verhalten von Härtersystemen [77, 78]. Das Härtersystem „Slow“ hat im Vergleich zu den Systemen „Standard“ eine doppelte und zu dem System „Fast“ eine viermal so lange Topfzeit. Über die Variation der Temperaturen des Härtersystems „Slow“ lässt sich die Topfzeit weiter stark variieren. Eine Reduktion der Temperatur von 23 °C auf 5 °C führt zu einer Verdopplung der Topfzeit. Eine Erhöhung der Temperatur von 23 °C auf 45 °C reduziert die Topfzeit auf 1/3. Demnach lassen sich die Prozesszeiten für eine Fertigung und die daraus entstehenden Verarbeitungseigenschaften aus diesen Versuchen ableiten, ohne aber absolute und direkt übertragbare Kennwerte anzugeben.

Als Ergebnis der Versuche muss geschlussfolgert werden, dass für weitere Untersuchungen und den praktischen Einsatz nur das Härtersystem „Slow“ genutzt werden kann, da die weiteren Systeme für die vollständige und reproduzierbare Füllung einer großen Kavität keine ausreichende Topfzeit aufweisen. Gleichzeitig kann die mögliche Verarbeitungstemperatur des Harz-Härter-Gemisches auf mindestens 10 °C und maximal 25 °C festgelegt werden. Bei Temperaturen unter 10 °C kommt es zu einer sehr langsamen und ungenügend einsetzenden Reaktion, während bei Temperaturen über 25 °C eine zu schnelle Reaktion einsetzt.

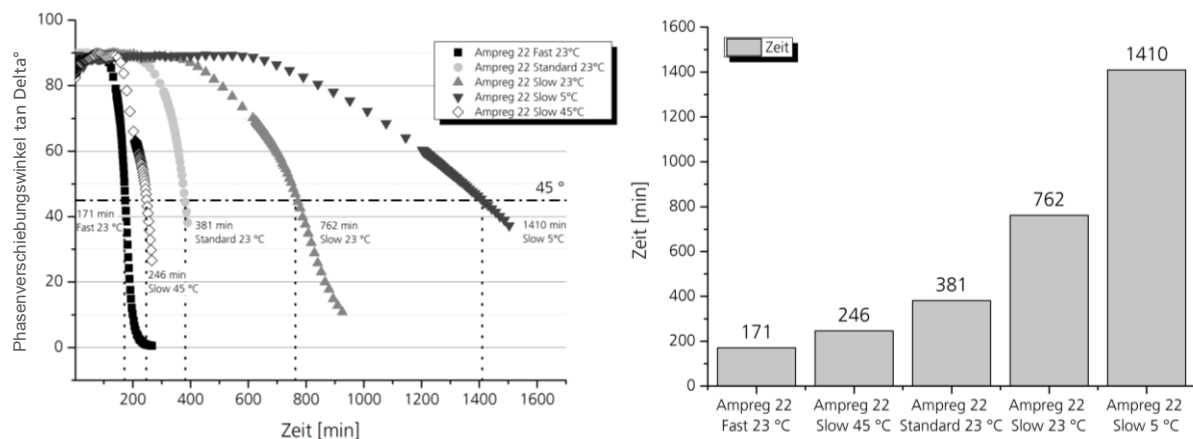


Abbildung 42: Ergebnisse der Bestimmung der Topfzeiten

6.2.3 Ermittlung des Einflusses des Temperungsprozesses auf die Aushärtung und die mechanischen Eigenschaften eines Matrixsystems

Die Temperung eines kaltaushärtenden Systems wird grundsätzlich noch in der Kavität oder nach der Entformung durchgeführt. Dabei wird das Bauteil einer erhöhten Temperatur für eine bestimmte Zeit ausgesetzt. Diese Temperatur erhöht die Vernetzung der einzelnen Moleküle miteinander. Entscheidend dabei sind die Dauer und die Temperatur. In den Datenblättern zu den Harzsystemen sind grundsätzlich sehr lange Temperungszyklen angegeben um eine

vollständige Vernetzung zu gewährleisten. Inwieweit die Temperung einen Einfluss auf die Vernetzung als auch auf die mechanischen Eigenschaften ausübt soll nachfolgend untersucht werden.

6.2.3.1 Kalorimetrische Untersuchungen

Der Einfluss eines Temperungsprozesses soll anhand der Bestimmung des Glasübergangspunktes T_g festgestellt werden [34]. Duomere werden nur bis zu ihrem Glasübergangspunkt eingesetzt, da nur bis zu diesem Punkt die maximalen Festigkeiten garantiert werden können. Die hier durchgeführten Untersuchungen dienen demnach der Bestimmung maximaler Einsatztemperaturen für einen FKV-Werkstoff. Weiterhin soll ermittelt werden, welchen Einfluss eine zusätzliche Temperung auf die Eigenschaften des EP-Matrixsystems hat.

Der Glasübergangspunkt stellt den Übergang vom energieelastischen in den entropieelastischen Bereich dar. In diesem Punkt kommt es zu thermodynamischen und mechanischen Eigenschaftsänderungen. Beim Übergang nehmen aus thermodynamischer Sicht die temperaturbedingte Wärmedehnung sowie die -kapazität eines Kunststoffs zu. Aus mechanischer Sicht kommt es im Glasübergangspunkt zu einem Abfall der Steifig- und Festigkeiten sowie zu einer Zunahme der Bruchdehnung und der Dämpfung. Im Bereich kleiner Dehnungen ist auch im entropieelastischen Bereich, trotz eines zähelastischen Verhaltens der Werkstoffe, weiterhin das Hookesche Gesetz für Kunststoffe gültig [34]. Es wird grundsätzlich unterschieden in den thermodynamischen und den mechanischen Glasübergangspunkt. Der thermodynamische Glasübergangspunkt wird durch eine DSC-Messung und eine Messung der entstehenden Reaktionswärme bestimmt, während der mechanische Glasübergangspunkt durch eine mechanische Belastung (DMA) bei unterschiedlichen Temperaturen und durch die Ermittlung der Materialsteifigkeiten ermittelt wird. Nachfolgend soll der Einfluss des Tempervorgangs auf den entstehenden Glasübergangspunkt untersucht werden.

Die optimale Temperung für das Harz-Härter-System Ampreg 22 mit dem Slow-Härter wird nach [55] mit einer Dauer von 16 h bei 50 °C angegeben. Mit diesem Temperzyklus sollen die höchsten mechanischen Eigenschaften erreicht werden. Die hier untersuchten Proben werden ebenfalls entsprechend der Datenblattvorgabe konditioniert. Zur Ermittlung des Einflusses des Temperungsprozesses werden getemperte und ungetemperte Proben untersucht. Die Bestimmung des thermischen Glasübergangspunktes T_g wird auf einem DSC-Gerät (Firma Mettler/Toledo Typ: DSC 1) nach DIN EN ISO 11357-2 durchgeführt [81]. Dazu wird der definierte Wärmestrom in einer Probe und einem leeren Referenztiegel gemessen, um eine Wärmestromdifferenz zwischen den beiden Tiegeln zu ermitteln. Aus dieser Differenz lässt sich, als Funktion der Zeit oder Temperatur, der Glasübergangspunkt T_g ermitteln. Der Glasübergangspunkt wird nach DIN EN ISO 11357-2 mithilfe des Wendepunktverfahrens bestimmt [81]. Das Ergebnis (vgl. Abbildung 43) dieser Untersuchungen zeigt, dass die EP-Matrixsysteme im getemperten und im nicht getemperten Zustand variierende thermodynamische Glasübergangspunkte aufweisen. Der T_g und damit der maximale temperaturbedingte Einsatzbereich des EP-Matrixsystems kann durch eine Temperung um bis zu 25 % (> 20 °C) erhöht werden. Durch die eingebrachte Energie entstehen Hohlräume, in denen sich Molekülketten umlagern können und eine weitere Vernetzung stattfinden kann [34]. Beim ungetemperten EP-Matrixsystem findet ab dem Erreichen einer Temperatur von ca. 72 °C eine Nachvernetzung der Molekülketten statt. Das getemperte EP-Matrixsystem weist einen

Glasübergangspunkt von ca. 95 °C auf. Bei diesem System findet keine weitere Vernetzung statt, da keine weiteren Hohlräume für eine Molekülkettenumlagerung existieren.

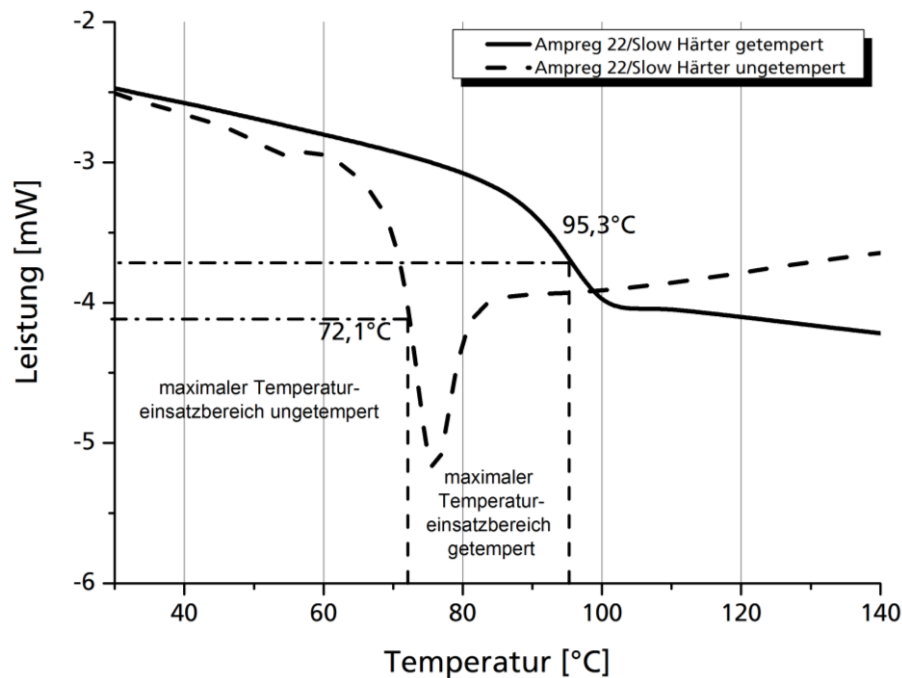


Abbildung 43: Ergebnisse der Untersuchung zur Bestimmung des Glasübergangspunktes T_g

Inwieweit sich diese Ergebnisse direkt auf die mechanischen Festigkeiten übertragen lassen, muss durch weitere mechanische Druckversuche und eine (DMA) nachgewiesen werden.

6.2.3.2 Druckversuche

Zur Bestimmung der Wirksamkeit des Temperungsprozesses auf die mechanischen Festigkeiten werden im Gießverfahren getemperte und ungetemperte Reinharzproben hergestellt und nach DIN EN ISO 604 [82] im mechanischen Druckversuch geprüft. Die Versuchsparameter für die Druckversuche sind nachfolgend in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: Prüfparameter der statischen Prüfung der Druckfestigkeit des Matrixsystems

Statische Prüfung auf ZWICK Z400E	
Parameter	Bezeichnung/Wert
Prüfgeschwindigkeit	5 mm/min
Wegmessung	Laserextensometer Fiedler Messelektronik, berührungslos
Vorkraft	500 N
Abbruchkriterium	Statische Last unterhalb 80 % von F_{max}
Regelung	Lagegeregelt
Herstellungsverfahren	Gießverfahren mit Ampreg 22 und „Slow“-Härter
Probenform	Rundprobe (D: 25 mm; H: 22 bis 24 mm)
Probenanzahl	7

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Temperung des Harzes zu einer Erhöhung der maximalen Druckfestigkeit um 11 %, einer Verringerung der Stauchung um 4 % und einer Erhöhung der Steifigkeit um 15 % führt. Daher kann geschlussfolgert werden, dass sich eine Temperung des Materials über 16 h bei 50 °C direkt positiv auf die mechanischen Festigkeiten auswirkt.

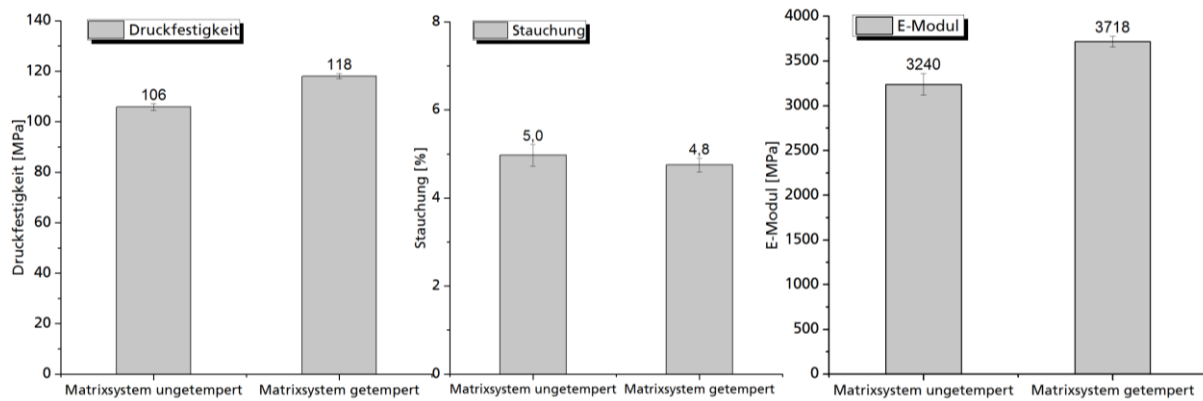


Abbildung 44: Einfluss des Temperungsprozesses auf die mechanischen Eigenschaften

6.2.4 Dynamisch-Mechanische-Analyse zur Bestimmung des Temperatureinsatzbereichs

Neben der stofflichen Analyse und Bestimmung des Glasübergangspunktes wird auch mittels einer DMA eine Materialcharakterisierung durchgeführt. Bei dieser wird ein Temperaturbereich von -165 °C bis 150 °C betrachtet, um die mechanischen Eigenschaften unter Tieftemperatur als auch bei erhöhten Temperaturen zu bestimmen. Die DMA wird in einem Dreipunkt-Biegeverfahren unter Beachtung der Normen DIN 65583, DIN 6721-1 und DIN EN ISO 6721-5 durchgeführt [83 bis 85]. Die quaderförmige Probe wird bei einer konstanten Frequenz von 1 Hz und in einem Temperaturbereich von -165 °C bis 150 °C bei einer Heizrate von 2 K/min dynamisch mechanisch geprüft. Der Prüfaufbau sowie der Probenaufbau sind folgend in Abbildung 45 dargestellt.

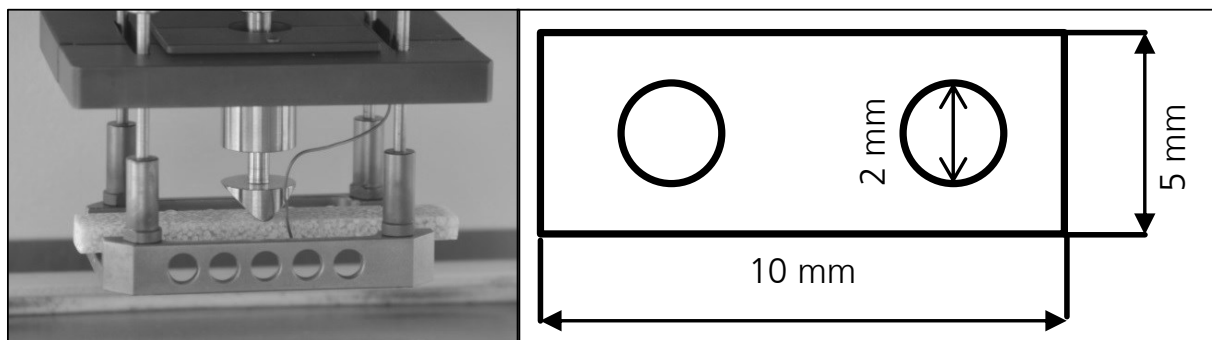


Abbildung 45: Prüfaufbau und Probengeometrie (Querschnitt mit Glasfaserstabdurchmesser) zur Prüfung mittels DMA

Die im Rahmen einer DMA zu ermittelnde Größe ist der Speichermodul E' . Dieser kann auf Grund des genutzten Werkstoffs mit dem komplexen E-Modul E^* gleichgesetzt werden. Dieser setzt sich aus dem Speicher E' (elastischer Anteil) und dem Verlustmodul E'' (viskoser Anteil) zusammen (vgl. Formel 18).

Formel 18: Zusammensetzung des komplexen E-Moduls

$$E^* = E' + i * E''$$

E' : Speichermodul
 E'' : Verlustmodul

Der FKV-Werkstoff weist jedoch in dem gewählten Temperatursegment nur einen sehr kleinen viskosen Anteil auf, so dass der Verlustmodul vernachlässigt werden kann. Es werden vergleichende DMA-Untersuchungen an den folgenden Materialkombinationen vorgenommen:

- Glasfaserstäbe-Blähglasgranulat-Harz
- Blähglasgranulat-Harz
- Harz

Aus den Versuchen kann der Einsatzbereich des Harzes unter mechanischer Belastung bei unterschiedlichen Temperaturen und mit unterschiedlichen Verstärkungs- und Füllstoffen abgeleitet werden. Die Versuchsergebnisse (vgl. Abbildung 46) zeigen, dass der Einsatzbereich mit -165 °C bis 50 °C angegeben werden kann. Ab 50 °C kommt es zu einem starken Abfall der mechanischen Eigenschaften im Bereich des mechanischen Glasübergangspunkts. Das duromere EP-Matrixsystem erweicht langsam und verliert dadurch seine mechanische Festigkeit [86, 87]. Die Abbildung 46 zeigt ebenfalls, dass sich bei unterschiedlichen Temperaturen alle Füllstoffe positiv auf die Materialeigenschaften auswirken. Das reine Harz zeigt im tiefkalten Bereich ein sprödes und steifes Verhalten; beginnt jedoch elastischer und weicher zu werden, wenn die Temperatur erhöht wird. Beim Erreichen des Glasübergangspunkts T_g (ca. 75 °C) kommt es zu einem starken Abfall des Speichermoduls bis hin zu ca. 10 MPa. Die mit Blähglasgranulat gefüllten Probekörper zeigen einen ähnlichen Verlauf. Ein Unterschied zeigt sich darin, dass das Blähglasgranulat eine erhöhte Materialsteifigkeit im Bereich zwischen -100 °C bis 50 °C von ca. 15 bis 20 % gegenüber dem ungefüllten Material aufweist. Durch die Verstärkung des Harzmaterials mit gerichteten Glasfaserstäben kann die Gesamtsteifigkeit des Materials um 25 % erhöht werden. Insbesondere im tiefkalten Bereich zwischen -165 °C und -50 °C ist eine Steigerung durch die Verstärkungstoffe zur Erhöhung der Materialsteifigkeiten zielführend.

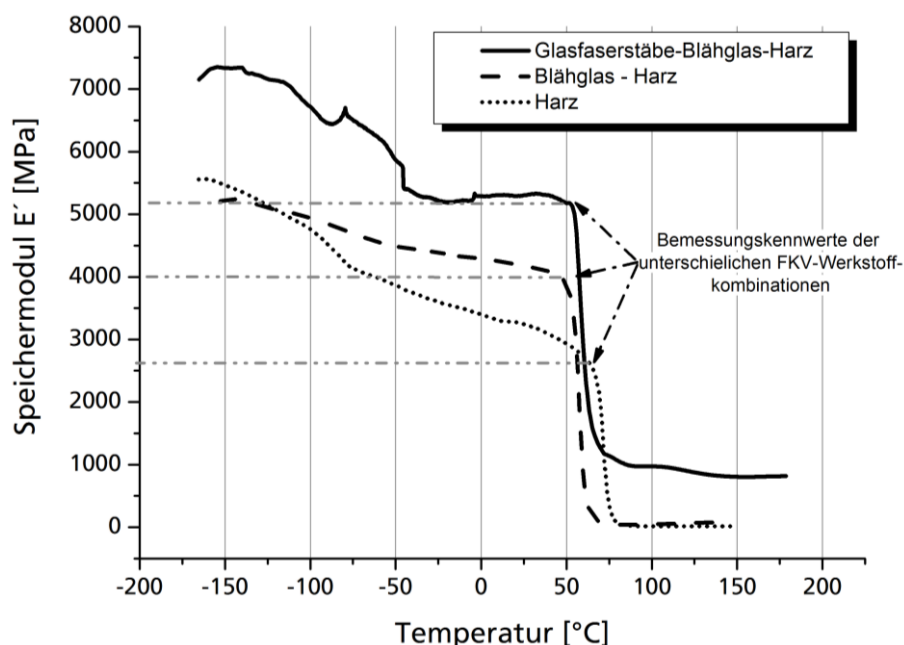


Abbildung 46: Ergebnisse der Bestimmung des Speichermoduls über der Temperatur

6.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Qualifizierung des Matrixsystems

Die Ergebnisse (vgl. Abbildung 47) der Untersuchung an dem Matrixsystem zeigen, dass eine Nutzung des Harz-Härter-Systems Ampreg 22 mit einem Slow-Härter geeignet ist. Die Ergebnisse weisen eine geringe exotherme Reaktion sowie eine ausreichende Topfzeit zur vollständigen Infusion der gesamten Kavität auf. Eine Temperung des Harzes führt zu einem steiferen und mechanisch stärker belastbaren Werkstoff und sollte bei einem industriellen Einsatz zur Fertigung von Auflagermaterialien unbedingt durchgeführt werden. Aus den DSC-Untersuchungen kann eine Steigerung des T_g durch eine Temperung von 25 % ermittelt werden, während die mechanische Druckfestigkeit nur um 15 % gesteigert werden kann. Das Material weist nach Prüfung in einer DMA einen Einsatztemperaturbereich von -165 °C bis +50 °C auf. Diese sind durch weitgehend konstante mechanische Eigenschaften definiert.

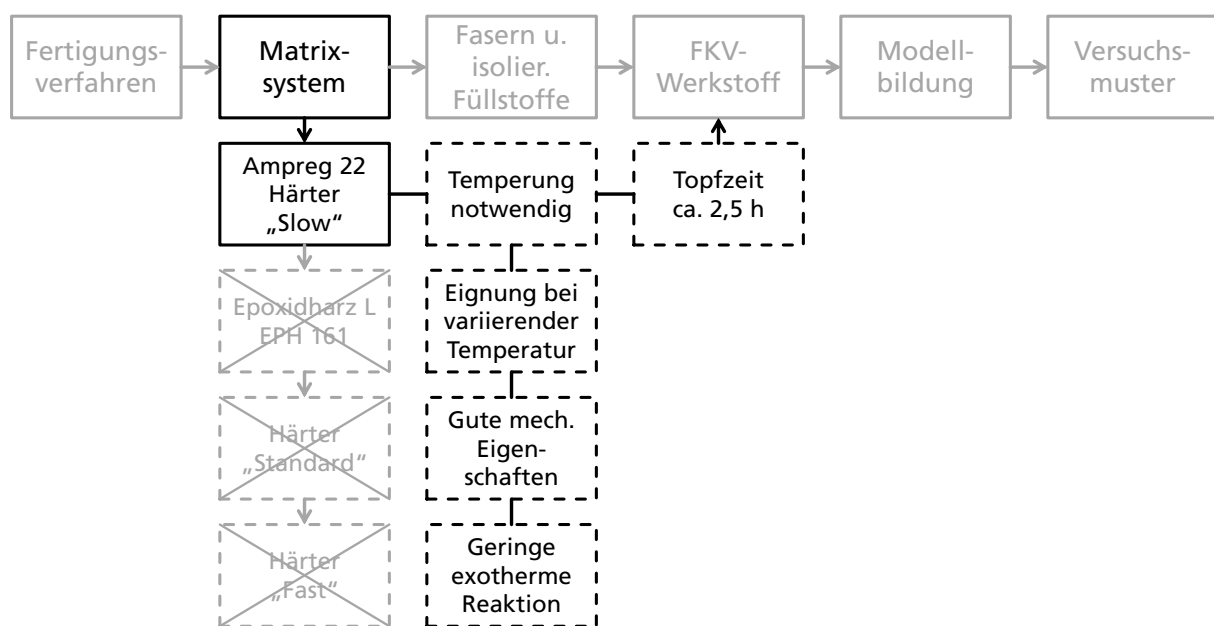


Abbildung 47: Ergebnisse der Untersuchungen an dem EP-Matrixsystem Ampreg 22 mit dem Härter "Slow"

6.3 Qualifizierung von Fasern und isolierenden Füllstoffen

Die Untersuchungen zu den möglichen Fertigungsverfahren haben gezeigt, dass die Nutzung von Glasfaserstäben und Blähglasgranulat zu favorisieren ist (vgl. Abbildung 48). Die Glasfaserstäbe sollen als festigkeitssteigernder und das Blähglasgranulat als thermisch isolierender Füllstoff eingesetzt werden. Nachfolgend sollen diese beiden Füllstoffe und deren ausgewählte Eigenschaften untersucht werden.

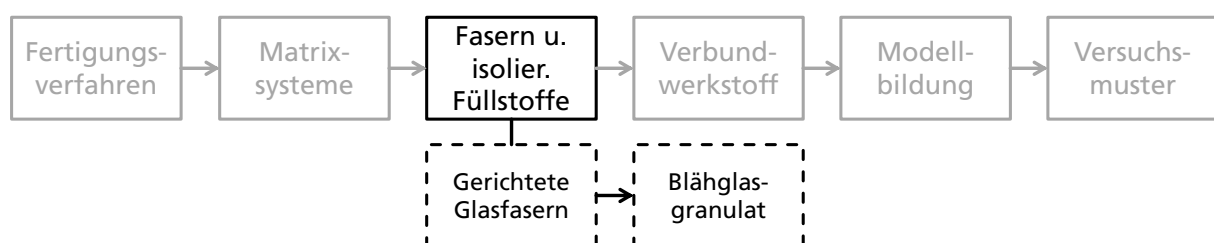


Abbildung 48: Übersicht der favorisierten Füllstoffe

6.3.1 Eigenschaften festigkeitssteigernder Glasfasern

Als festigkeitssteigernde Faser in einem EP-Matrixsystem wird die Nutzung gerichteter Glasfaserstäbe angestrebt. Die Untersuchungen zu diesen Halbzeugen konzentrieren sich dabei auf die Bestimmung der mechanischen Druckeigenschaften für eine spätere analytische Modellberechnung und die Bestimmung des Faservolumengehalts. Ferner wird die Maßhaltigkeit der Stäbe zur Garantie einer gleichbleibenden Fertigungsqualität untersucht. Die durchgeführten Versuche an den Glasfaserstäben sind in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25: Verfahren zur Kennwertermittlung an Glasfaserstäben

Experimentelle Versuche:	Normung	Ziel
Druckfestigkeit	In Anlehnung an ISO 3597-3	Ermittlung der mechanischen Eigenschaften in Glasfaserrichtung zur Bestimmung der Druckeigenschaften (Druckfestigkeit σ_D , E-Modul E)
Faservolumengehalt	DIN EN ISO 1172	Ermittlung des Anteils an Glasfasern im Verbund aus Fasern und Matrix zur Bestimmung einer reproduzierbaren Fertigung
Krümmung der Stäbe	-	Ermittlung der Krümmung der Stäbe nach dem Abrollen von der Transportsicherung und nach Lagerung

6.3.1.1 Druckeigenschaften der Einzelglasfaserstäbe

Die Bestimmung der Druckeigenschaften konzentriert sich auf die Durchführung von Druckversuchen an einzelnen Stabprobekörpern. Die Versuche werden in Anlehnung an ISO 3597-3 [88] durchgeführt. Zur Durchführung werden Einzelstäbe präpariert, die anschließend in einer Universalprüfmaschine bis zum Versagen belastet werden [81]. Die Prüfparameter sind in Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 26: Prüfparameter für Druckversuche an einzelnen Glasfaserstäben

Statische Prüfung Glasfaserstäbe auf ZWICK Z400E	
Parameter	Bezeichnung/Wert
Normung	In Anlehnung an ISO 3597-3
Prüfgeschwindigkeit	1 mm/min
Wegmessung	Laserextensometer Fiedler Messelektronik, berührungslos
Abbruchkriterium	Statische Last unterhalb 80 % von F_{max}
Regelung	Lagegeregelt
Herstellungsverfahren	Eingießen der Enden in Epoxidharz
Probenform	Rundprobe D: 1,97 mm; H: 12 mm; D Ende: 6 mm
Probenanzahl	7

In Vorversuchen kann gezeigt werden, dass eine Belastung der Stirnseiten der Proben zu starken Delaminationen führt. Diese verfälschen das Prüfergebnis zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Glasfaserstäbe nachhaltig, weshalb eine Modifikation des Prüfaufbaus vorgenommen wird. Dazu werden Proben durch ein Eingießen in Epoxidharzblöcke an den Enden verstärkt, mit dem Effekt, dass die Krafteinleitung nicht mehr ausschließlich über die

Stirnflächen, sondern unterstützt durch die Einbringung von Schubkräften über die Probekörperlänge auf den Probekörper übertragen wird. Die Ergebnisse der Untersuchungen an den Stäben sind nachfolgend in Abbildung 50 dargestellt. Die kritische Knicklänge wird nach Euler Fall 4 mit folgender Formel 19 berechnet. Für die Versuche wird eine Probenlänge von 12 mm gewählt. Diese ist mit einer Sicherheit von 3 gegen Knicken ausgelegt.

Formel 19: Berechnung der kritischen Knicklänge nach Euler

$$F_K = \frac{\pi^2 * E * I}{s^2}$$

$$s = \frac{1}{0,5} * \sqrt{\frac{\pi^2}{F_K} * E * I}$$

$$= 36 \text{ mm}$$

E: Elastizitätsmodul = 40.000 MPa
 I: Flächenträgheitsmoment = 0,709
 F_K: Knickkraft = 8.487 N
 s: Knicklänge mit $s = L * \beta$; $\beta = 0,5$
 L: Stablänge

Die Ergebnisse der Untersuchungen an Glasfaserstäben sowie die Bruchbilder sind nachfolgend in Abbildung 49 und Abbildung 50 dargestellt.

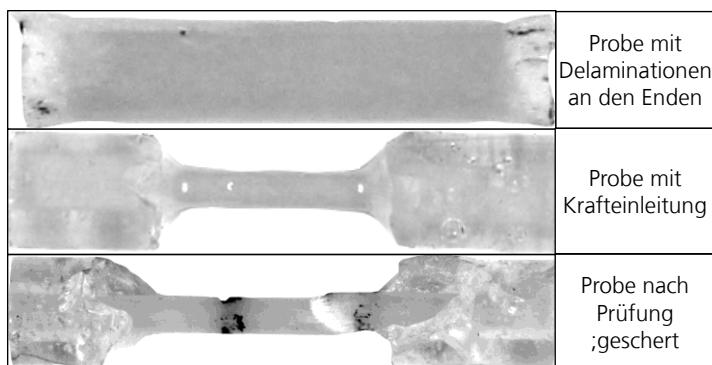


Abbildung 49: Probekörper der Glasfaserstäbe vor und nach dem Druckversuch

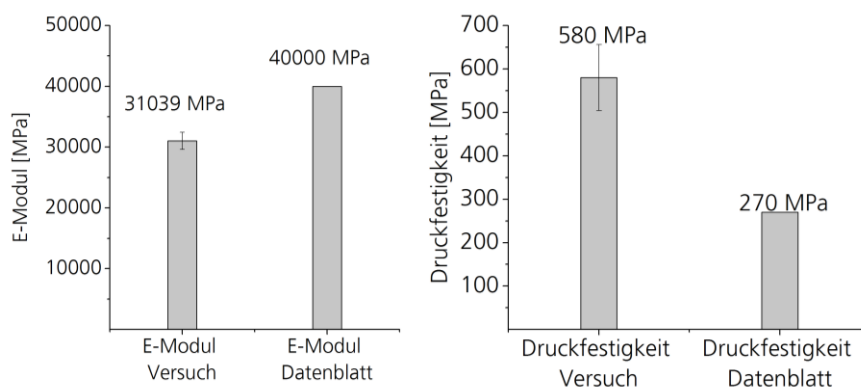


Abbildung 50: Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchungen an einzelnen Glasfaserstäben und Vergleich Datenblattangaben

Der Versuchsausgang zeigt starke Abweichungen zu den Ergebnissen der Datenblatt- bzw. Herstellerangaben [62]. Die Ursachen können in einem unterschiedlichen Prüfaufbau begründet

sein, der aber an dieser Stelle nicht nachgewiesen werden kann. Die Unterschiede können daher nicht eindeutig erklärt werden. Für die spätere analytische Modellberechnung werden die experimentell ermittelten Ergebnisse der Untersuchungen herangezogen.

6.3.1.2 Faservolumengehalt Glasfaserstäbe

Für eine Verwendung von Glasfaserstäben, die in einem Pultrusionsprozess hergestellt werden, ist ein wesentliches Qualitätskriterium, dass die Stäbe einen gleichbleibenden Faservolumengehalt (FVG) aufweisen. Die Anzahl der Fasern hat, wie bereits beschrieben, einen maßgeblichen Anteil an der mechanischen Festigkeit der Auflagerblöcke. Daher müssen die Stäbe über einen gleichbleibenden Faservolumengehalt (FVG) verfügen. Der FVG wird in Anlehnung an die DIN EN ISO 1172 [89] in einem thermischen Kalzinierungsverfahren bestimmt (vgl. Tabelle 27).

Tabelle 27: Prüfparameter für die Kalzinierung von Glasfaserstäben

Kalzinierung Stäbe	
Parameter	Bezeichnung/Wert
Normung	DIN EN ISO 1172
Probenabmaße	D: 2mm; L: 25 mm
Trocknung	24 h bei 110 °C
Kalzinierung	625 °C
Wägung	Feinwaage KERN
Probenanzahl	5

Dazu werden nach einem Trocknungsprozess abgelängte Glasfaserstäbe in einem Muffelofen bis zur vollständigen Zersetzung des organischen Harzanteils konditioniert. Durch einen Wägeprozess vor und nach der thermischen Zersetzung lässt sich der Fasermassenanteil bestimmen. Die Ergebnisse der Versuche sind nachfolgend in Abbildung 51 dargestellt. Es zeigt sich, dass ein durchschnittlicher FVG von reproduzierbaren 63,4 % bei den Probestäben vorliegt. Üblicherweise lassen sich im Pultrusionsverfahren Faservolumenanteile von 50 bis zu 80 % erreichen [19]. Demnach liegen die hier ermittelten Ergebnisse im Soll für industriell hergestellte Pultrusionshalbzeuge (vgl. Abbildung 51).

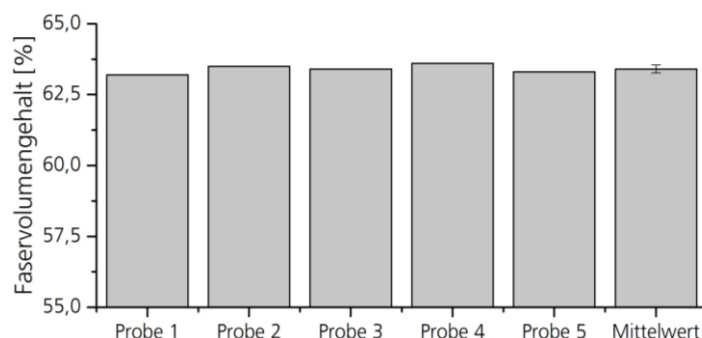


Abbildung 51: Ergebnisse der Kalzinierung der Einzelstäbe

6.3.1.3 Krümmung der Glasfaserstäbe

Auf Grund des Herstellungsprozesses als Endlosfaser im Pultrusionsprozess und einem anschließenden Aufrollen entstehen Krümmungen in den Stäben. Diese Krümmungen sind sehr stark ausgeprägt, wenn die Stäbe direkt von der Rolle verarbeitet werden und eine Länge von

mehr als 100 mm aufweisen. Werden die Stäbe hingegen über eine längere Zeit als Stab liegend, lose gelagert, ist eine Entkrümmung unabhängig von der Stablänge festzustellen. Die folgende Abbildung 52 zeigt schematisch die einsetzende Entkrümmung der Stäbe nach einer Lagerung von ca. 3 Monaten.

Stab 150 mm mit Krümmung nach Ablängung von Rolle



Stab 150 mm nach dreimonatiger Lagerung – ohne Krümmung



Abbildung 52: Schematische Darstellung gekrümmter und ungekrümmter Stabstrukturen nach dem Ablängen von der Rolle sowie nach dreimonatiger Lagerung

6.3.2 Eigenschaften Blähglasgranulat - Poraver

Als thermisch isolierender Füllstoff soll das Blähglasgranulat mit dem Markennamen Poraver™ genutzt werden. Die Untersuchungen der Fertigungsverfahren (vgl. Kapitel 6.1) haben gezeigt, dass das Blähglasgranulat reproduzierbar verarbeitet werden kann. Ferner muss der Einfluss von Blähglasgranulat auf ein EP-Matrixsystem untersucht werden. Die durchzuführenden Versuche werden in Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 28: Verfahren zur Kennwertermittlung an Blähglasgranulat mit und ohne Epoxidharzmatrix

Experimentelle Versuche zur Bestimmung der:	Normung	Ziel
Druckfestigkeit	DIN EN ISO 604	Ermittlung der mechanischen Druckeigenschaften
Dichtebestimmung	-	Ermittlung der Einwirkungen auf eine Gewichtsreduktion

Neben der Ermittlung des Einflusses auf die Festigkeit wird eine Dichtebestimmung eines mit Blähglasgranulat gefüllten EP-Matrixsystems durchgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass das Blähglasgranulat einen negativen Einfluss auf die ursprüngliche Festigkeit des EP-Matrixmaterials ausübt. Es wird ebenfalls, durch die Einbringung dieses Füllstoffs eine Reduktion der Dichte erwartet.

6.3.2.1 Bestimmung der Druckfestigkeit

Das Einbringen von Blähglasgranulat in das EP-Matrixsystem Ampreg 22 führt im statischen Druckversuch (Parameter siehe Tabelle 29) zu einer Reduktion der Festigkeit um ca. 65 %. Weiterhin reduziert sich das E-Modul der mit Blähglasgranulat modifizierten Proben um ca. 50 %. Auch die maximale Stauchung wird um ca. 30 % reduziert. Das Einbringen von Blähglasgranulat hat einen starken Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von EP-Matrixsystemen.

Tabelle 29: Prüfparameter für die statische Prüfung der Druckfestigkeit von Epoxidharz gefüllt mit Blähglasgranulat

Statische Prüfung auf ZWICK Z400E	
Parameter	Bezeichnung/Wert
Normung	DIN EN ISO 604
Prüfgeschwindigkeit	5 mm/min
Wegmessung	Laserextensometer Fiedler Messelektronik, berührungslos
Vorkraft	500 N
Abbruchkriterium	Statische Last unterhalb 80 % von F_{\max}
Regelung	Lagegeregelt
Herstellungsverfahren	Vakuuminfusionsverfahren mit Ampreg 22 und „Slow“-Härter
Probenform	Rundprobe (D: 25 mm; H: 22 bis 24 mm)
Probenanzahl	6

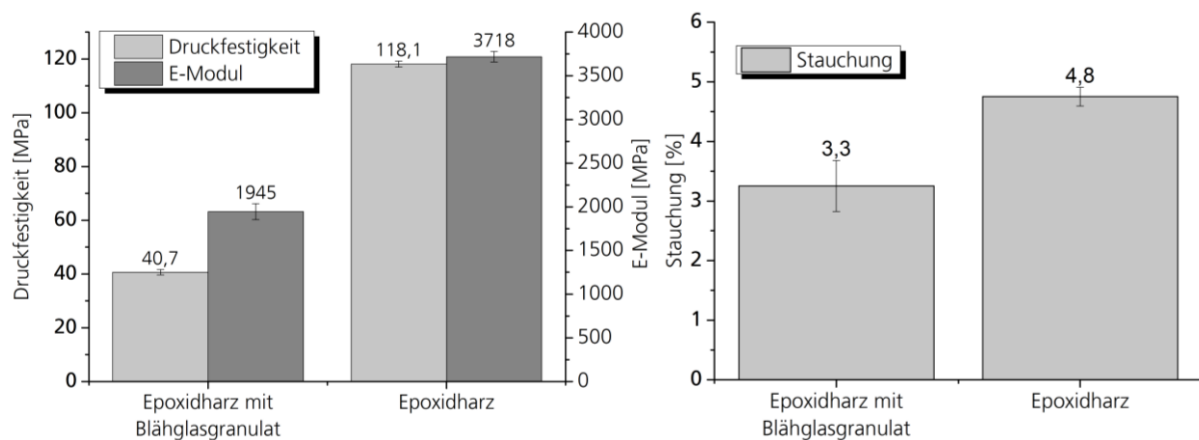


Abbildung 53: Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchungen

6.3.2.2 Ermittlung der mittleren Dichte von blähglasmodifizierten EP-Matrixsystemen

Die Bestimmung der gemittelten Materialdichten soll einen Aufschluss über die Eigenschaft des Blähglasgranulats im Hinblick auf eine Reduktion des FKV-Werkstoffgewichts geben. Dazu wird die gemittelte Dichte mithilfe der Formel 20 und den Prüfparametern in Tabelle 30.

Formel 20: Formel zur Bestimmung der Dichte eines quaderförmigen Körpers

$$\rho = \frac{m}{V}$$

V: Volumen cm^3
 ρ : Dichte des Probenkörpers in g/cm^3
 m: Masse des Probenkörpers in g

Tabelle 30: Prüfparameter zur Dichtebestimmung an Epoxidharz mit Blähglasgranulat

Bestimmung der Dichte von Epoxidharz mit Blähglasgranulat	
Parameter	Wert
Normung	-
Messmittel Gewicht	KERN Feinmesswaage (Messbereich 0,1 bis 120 g auf 0,1 mg)
Messmittel Maße	Messschieber
Probenform	quaderförmig (D: 10 mm; H: 10 mm; B: 10 mm)
Probenanzahl	5

Im Ergebnis zeigt sich, dass der Einsatz von Blähglasgranulat als Füllstoff zu einer Reduktion der Dichte gegenüber einem unmodifizierten EP-Matrixsystem von ca. 18 % führt.

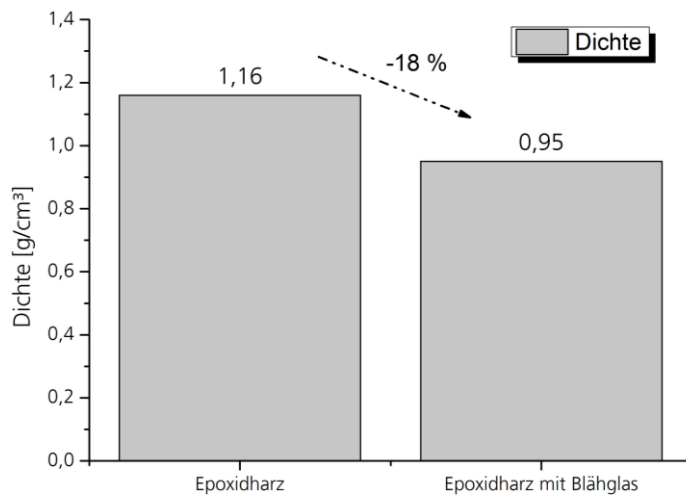


Abbildung 54: Darstellung der Materialdichten von reinem Epoxidharz und mit Blähglasgranulat gefülltem Epoxidharz

6.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Qualifikation der Fasern und den isolierenden Füllstoffen

Die Untersuchungen zu den Füllstoffen können wie folgt zusammengefasst werden (vgl. Abbildung 55). Die Glasfaserstäbe bringen sehr gute mechanische Eigenschaften als festigkeitssteigernde Füllstoffe mit. Der gleichbleibende FVG der Stäbe garantiert eine gleichbleibende Qualität, so dass auch die mechanischen Eigenschaften garantiert werden können. Eine etwaige Krümmung der Stäbe kann durch eine Lagerung dieser in liegender Form reversibel gemacht werden. Die Einbringung von Blähglasgranulat führt zu einer Reduktion der mechanischen Festigkeiten in einem EP-Matrixsystem und gleichzeitig zu einer Dichtereduktion.

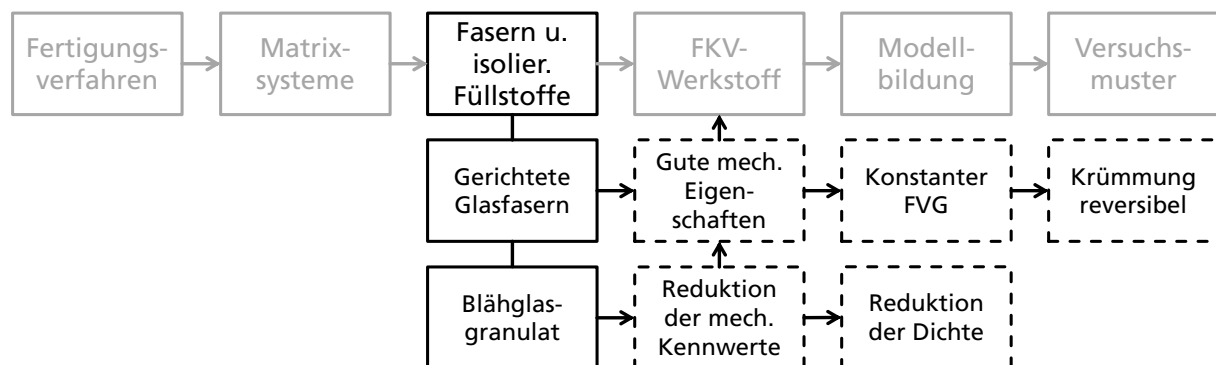


Abbildung 55: Ergebnisse der Untersuchungen an Füllstoffen für EP-Matrixsysteme

6.4 Experimentelle Qualifizierung des FKV-Werkstoffs

Nach den Einzeluntersuchungen an den Fertigungsverfahren, dem EP-Matrixsystem und den Füllstoffen soll nun nachfolgend der aus den Einzelkomponenten zusammengesetzte FKV-Werkstoff untersucht werden. Ziel der Untersuchung ist eine Qualifizierung des FKV-Werkstoffs entsprechend der bereits definierten Anforderungen. Es werden nachfolgend

die in Abbildung 48 dargestellten Untersuchungskomplexe in diesem Kapitel behandelt. Die für diese Untersuchungen genutzte qualitative Werkstoffzusammensetzung ist:

- EP-Matrixsystem Ampreg 22 mit Härter-„Slow“
- gerichtete Glasfaserstäbe als festigkeitssteigernder Füllstoff
- Blähglasgranulat mit 1 bis 2 mm Durchmesser

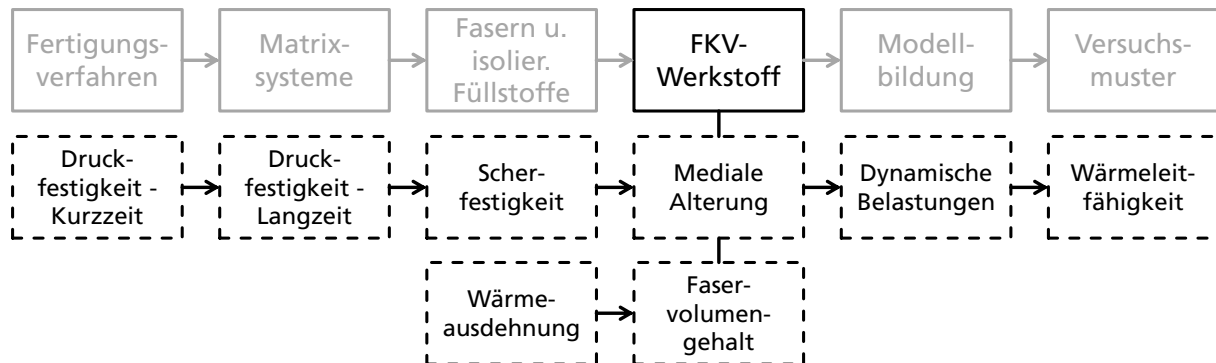


Abbildung 56: Übersicht der experimentellen Untersuchungen zur Qualifizierung des FKV-Werkstoffs

6.4.1 Kurzzeitdruckfestigkeit

Ausgehend von der Belastung der Auflager durch das Tankgewicht sowie dem Wellenschlag wird die Qualifizierung des FKV-Werkstoffs mit der Ermittlung der maximalen Kurzzeitdruckfestigkeit begonnen. Zur Überprüfung dieser Anforderung wird an zylindrischen Probekörpern die quasistatische Druckfestigkeit σ_D [MPa] nach DIN EN ISO 604 [82] bis zum Bruch ermittelt (vgl. Prüfparameter Tabelle 31). Nachfolgend ist der Versuchsaufbau grafisch in Abbildung 57 dargestellt.

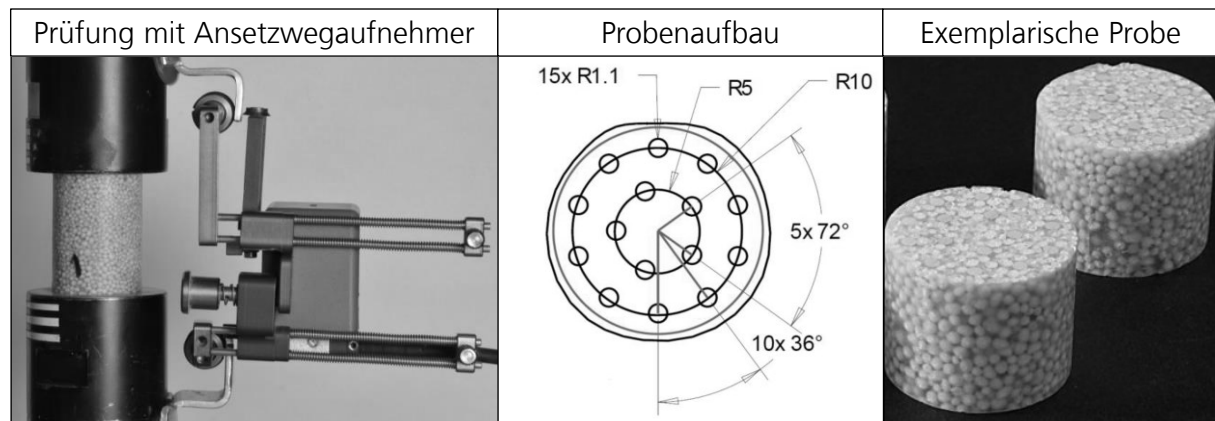


Abbildung 57: Prüfaufbau für Druckversuche nach DIN EN ISO 604

Tabelle 31: Kennwerte der mechanischen Untersuchungen zur Kurzzeitdruckfestigkeit

Statische Prüfung auf ZWICK Z400E	
Parameter	Bezeichnung/Wert
Normung	DIN EN ISO 604
Prüfgeschwindigkeit	5 mm/min
Wegmessung	Laserextensometer Fiedler Messelektronik, berührungslos
Vorkraft	500 N
Abbruchkriterium	Statische Last unterhalb 80 % von F_{\max}
Regelung	Lagegeregelt
Herstellungsverfahren	Vakuuminfusionsverfahren mit Ampreg 22 und „Slow“-Härter
Probenform	Rundprobe (D: 25 mm; H: 22 bis 24 mm)
Probenanzahl	10
Orientierung Glasfaserstäbe	In Druckrichtung

Die Ergebnisse des Versuchs zeigen eine Zweiteilung der Kurvenverläufe. Die Proben 1 bis 5 weisen mit einer maximalen Druckfestigkeit von 90 MPa eine um ca. 23 % höhere Druckfestigkeit gegenüber den Proben 6 bis 10 mit ca. 70 MPa auf (vgl. Abbildung 58).

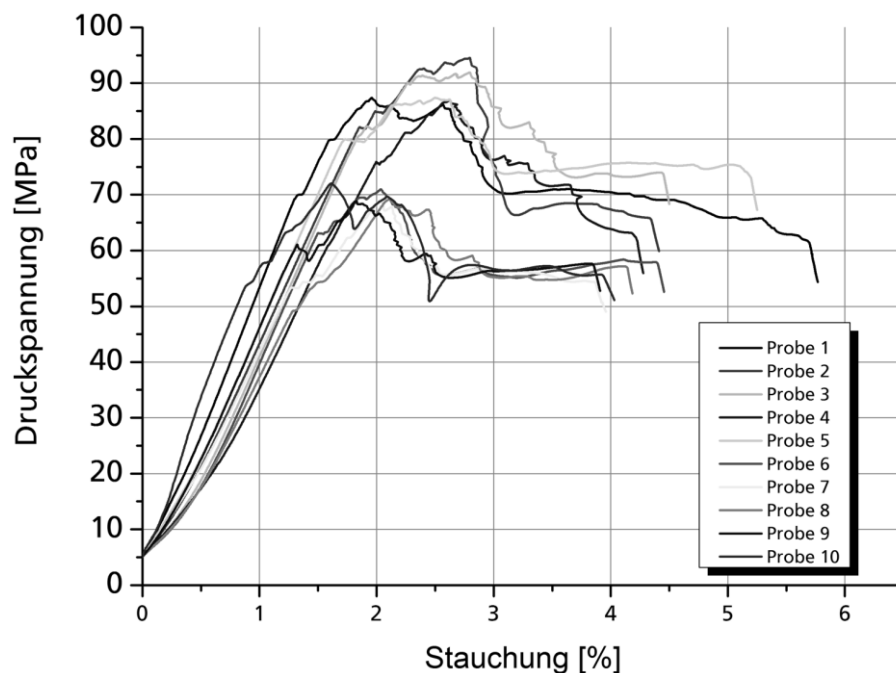


Abbildung 58: Verlauf der Druckfestigkeit über der Stauchung - FKV-Werkstoff

Die Ursachen dafür liegen nach einer optischen Beurteilung der Probenkörper in der unterschiedlichen Korngröße des Blähglasgranulats. Dies ist auf einen zufälligen Fehler zurückzuführen. Die Füllstoffe werden in Gebinden mit einer Durchmesserangabe von 1 bis 2 mm verkauft. Werden die Gebinde örtlich gelagert und es kommt zu einer Entnahme der Füllstoffe setzen sich die kleineren Kugelgrößen (1 mm Durchmesser) am Boden ab und die größeren Kugeln (2 mm Durchmesser) schwimmen auf und werden folglich zuerst entnommen. Bei der Herstellung der Probekörper kam es zu einem Gebindefwechsel, so dass die Proben 1 bis 5 mit kleineren Kugeln aus einem beinahe leeren Gebinde und die Proben 6 bis 10 mit Kugeln aus einem neuen Gebinde befüllt worden sind. Die optische Beurteilung der Probekörper und die unterschiedlichen Durchmesser der Füllstoffe sind exemplarisch in Abbildung 59 an den Probenkörpern 1 und 6 dargestellt.

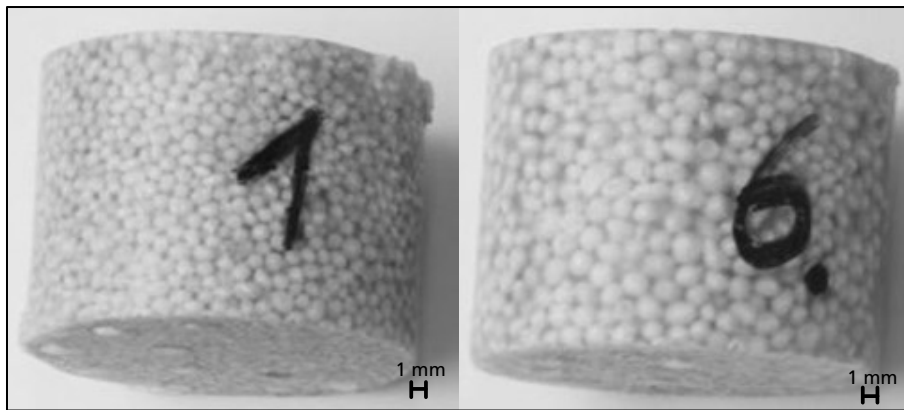


Abbildung 59: Unterschiedliche Füllstoffdurchmesser in Probekörpern

Diese Theorie wird durch Werte aus den Blähglasgranulatdatenblättern, bei denen kleinere Kugeldurchmesser größere mechanische Festigkeiten aufweisen als größere Durchmesser, gestützt [71, 72, 90]. Die Ergebnisse in Abbildung 60 zeigen daher sehr deutlich, dass eine Durchmischung der Füllstoffe und eine gleichmäßige Verteilung der Kugeldurchmesser für eine reproduzierbare Herstellung von Auflagermaterialien zwingend notwendig sind. Es wird im Rahmen der Arbeit weiterhin an Blähglasgranulat mit einem Durchmesser von 1 bis 2 mm festgehalten, da dieses vom Hersteller nur in dieser Kombination angeboten wird und eine Trennung unter Laborbedingungen nicht gewährleistet werden kann.

Für eine Beurteilung der mechanischen Festigkeiten und für eine Bereitstellung von belastbaren Kennwerten werden die durchschnittliche Druckfestigkeit mit ca. 80 MPa, die Materialsteifigkeit mit 4.552 MPa und die Stauchung bei Bruch mit 2,2 % angegeben.

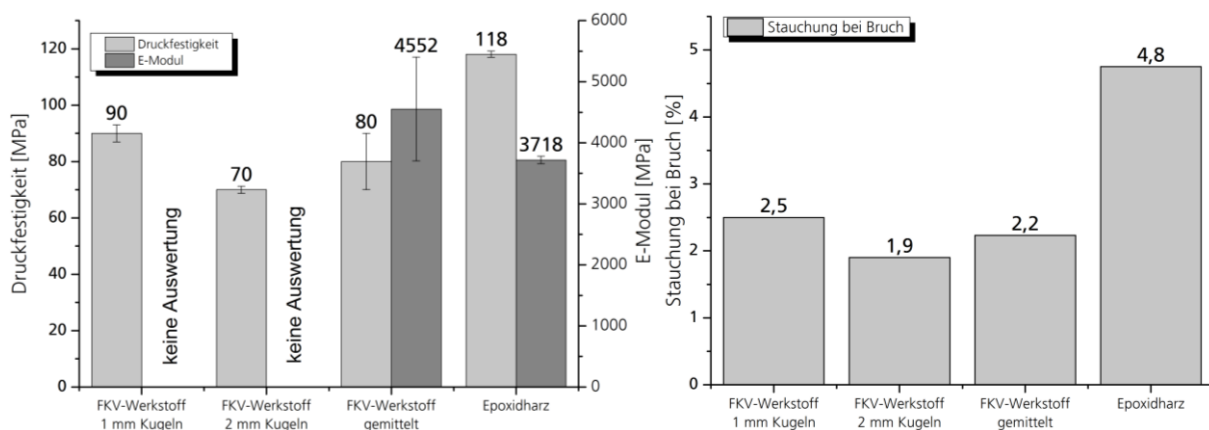


Abbildung 60: Vergleich Druckfestigkeiten und Stauchung bei Bruch

6.4.2 Langzeitdruckfestigkeit

Neben den statischen Spitzenlasten wird durch das Tankgewicht weiterhin eine dauerhafte Drucklast (vgl. Kapitel 4.1 Tanksystem Typ-C mit einer Druckspannung von 1,7 MPa) auf die Lagerstrukturen ausgeübt. Um den FKV-Werkstoff für diese Anforderung zu qualifizieren, sollen Langzeitdruckfestigkeiten mithilfe einer dauerhaften statischen Belastung durchgeführt werden. Die Ermittlung der statischen Dauerdruckfestigkeit erfolgt unter Beachtung der Norm DIN EN ISO 899-1 [91], da für die Ermittlung der Dauerdruckfestigkeit an Faserverbundproben im Druckversuch keine expliziten Normen vorliegen. Es wird eine Messung der Retardation

(gleichbleibende Spannung bei zunehmender Dehnung) vorgenommen. Zur Durchführung der Versuche wird eine Prüfvorrichtung genutzt, mit der es möglich ist, eine dauerhafte Druckspannung von 10 MPa auf einen Probekörper aufzubringen (vgl. Abbildung 61). Die dauerhafte Druckspannung ist damit ca. dreimal höher als die benötigte Druckspannung bei einer beispielhaften statischen Belastung des Tanks Typ-C mit ca. 3,4 MPa und unter Berücksichtigung aller Sicherheitsfaktoren. Die Druckkraft wird über ein Hebelsystem und ein daran befestigtes Gewicht realisiert. Die Dehnungen der Probekörper werden über eine digitale Messuhr und eine manuelle Dokumentation ermittelt (vgl. Abbildung 74).

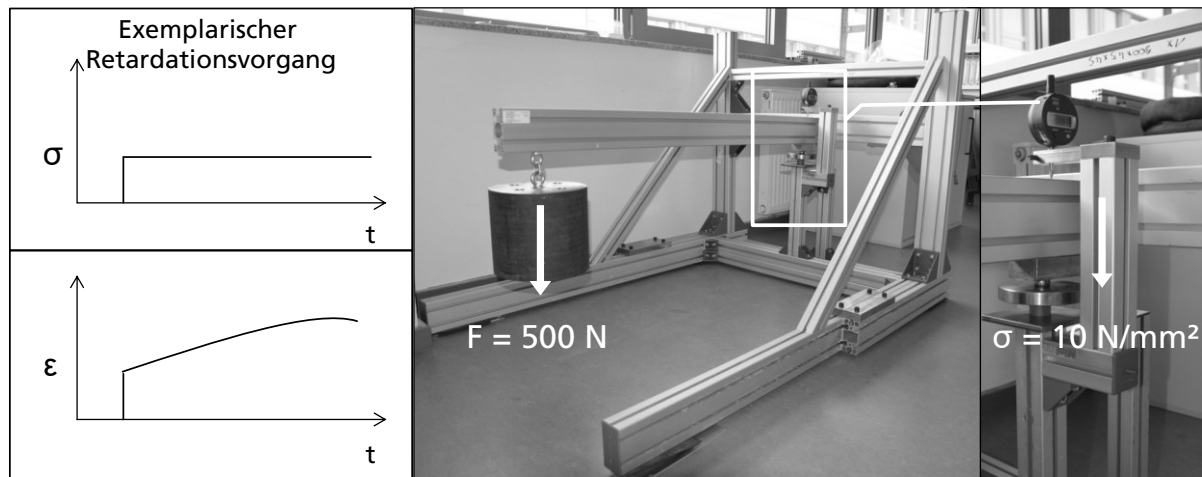


Abbildung 61: Schematischer Spannungs- und Dehnungsverlauf (li.) sowie Prüfaufbau (re.)

Zur Untersuchung der Kriecheigenschaften werden zwei Versuche mit unterschiedlichen Aufbauten durchgeführt. Zum einen wird die Kurzdauerfestigkeit auf einer Universalprüfmaschine für 60 h bei einer Dauerbelastung von 10 MPa ermittelt. Dieser Versuch dient der Validierung für eine Eigenkonstruktion eines Dauerprüfstands zur Untersuchung der Dauerdruckbelastung. Zum anderen wird anschließend die Dauerdruckfestigkeit über 55 Tage auf einem Dauerprüfstand ermittelt. Dieser Versuch wird ebenfalls bei einer konstanten Dauerlast von 10 MPa durchgeführt. Diese Untersuchung dient der Ermittlung der Langzeitbeständigkeit der Probekörper gegen Retardationsvorgänge im Material. Die Parameter des Versuchs sind folgend in Tabelle 32 dargestellt.

Tabelle 32: Prüfparameter zur mechanischen Untersuchung im Kriechversuch

Kriechversuch auf ZWICK Z400E und Dauerprüfstand	
Parameter	Bezeichnung/Wert
Normung	In Anlehnung an DIN EN ISO 899-1/2
Prüfdauer	60h auf Z400E; 55 Tage auf Dauerprüfstand
Wegmessung	Laserextensometer Fiedler Messelektronik, berührungslos auf Z400 E, analoge Messuhren (0,001) auf Dauerprüfstand
Dauerhafte Spannung	10 MPa
Umgebungstemperatur	RT (20 bis 25 °C) ungeregelt
Abbruchkriterium	Erreichen der festgelegten Zeiten von 60h und 55 Tagen
Regelung	Kraftgeregelt
Herstellungsverfahren	Vakuuminfusionsverfahren mit Ampreg 22 und „Slow“-Härter
Probenform	Rundprobe (D: 25 mm; H: 22 bis 24 mm)
Probenanzahl	1 auf Z 400 E, 3 auf Dauerprüfstand
Orientierung Glasfaserstäbe	In Druckrichtung

Die Ergebnisse der Validierung in Abbildung 62 zeigen, dass die Ergebnisse der Untersuchung zur Dauerdruckbelastung und zur Langzeitbeständigkeit um 6 % differieren. Die Abweichungen können aus Messungenauigkeiten bei der Verschiebungsmessung sowie auf Imperfektionen der Probekörper und damit einer geringeren/erhöhten Verschiebung zurückzuführen sein. Bei einer Extrapolation dieser Ergebnisse auf 30 Jahre¹⁰ ergibt sich für die Untersuchung auf der Universalprüfmaschine eine prozentuale Verschiebung von 10 % mit einer nominellen Verschiebung von 0,05 mm. Für den Versuch auf dem Dauerprüfstand ergibt sich eine prozentuale Verschiebung von 9 % bei einer nominellen Verschiebung von 0,04 mm. Damit sind nur sehr kleine Verschiebungen über die gesamte Lebensdauer eines Auflagerblocks zu erwarten. Weiterhin zeigen die Ergebnisse der Prüfungen auf dem Dauerprüfstand, dass es auf Grund der Glasverstärkungen in Druckrichtung, zu keinen bzw. nominell sehr kleinen (Bereich 0,05 mm) Retardationsvorgängen im Material kommt.

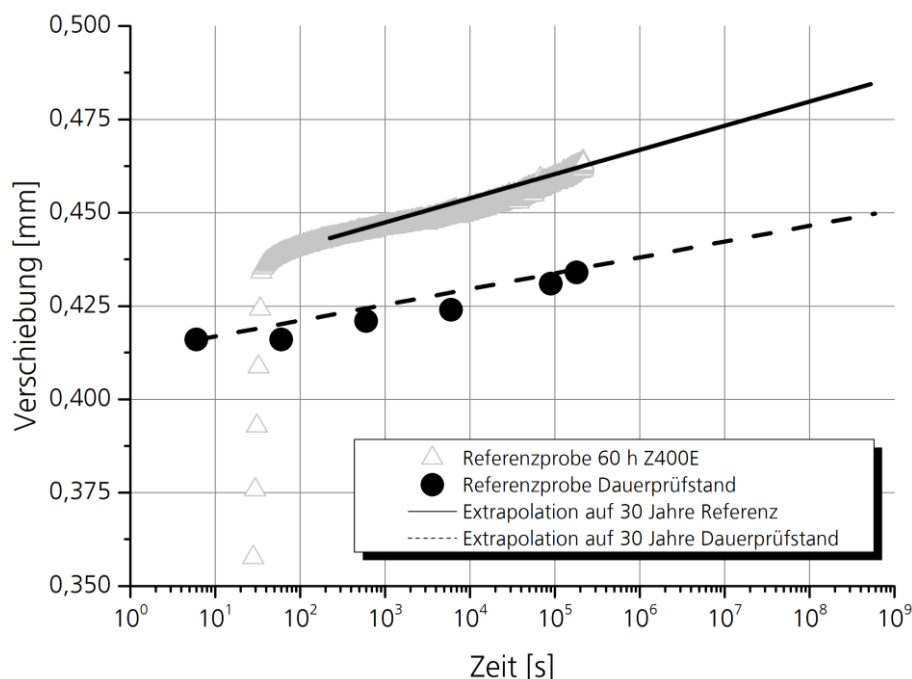


Abbildung 62: Ergebnisse aus Validierung Versuchsaufbau (li.) und Dauerversuch über 55 Tage (re.)

6.4.3 Scherfestigkeit

Zur Bestimmung der Schereigenschaften des FKV-Werkstoffs werden Scherfestigkeitsversuche nach ASTM D 5379 [92] im Iosipescu-Verfahren durchgeführt (vgl. Abbildung 63).

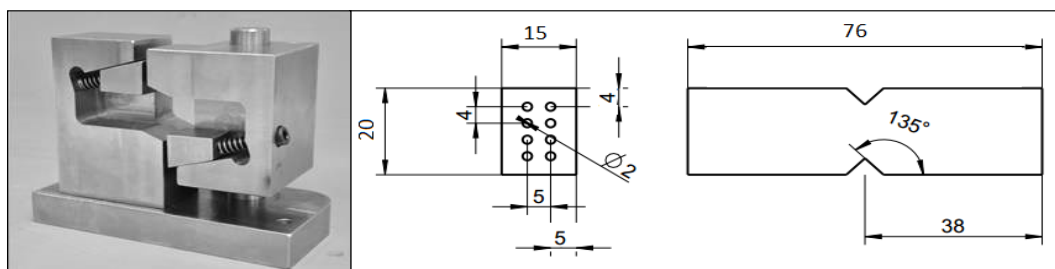


Abbildung 63: Aufbau und Probenform Scherfestigkeitsuntersuchungen nach dem Iosipescu-Verfahren

¹⁰ Unter der Annahme, dass weitere Setzvorgänge eine gleichbleibende flache Steigung aufweisen

Auf Grund der Prüfeinrichtung ist auch eine Prüfung dickerer Materialien durch Anpassung der Einrichtung möglich [86, 93]. Die Prüfeinrichtung besteht aus zwei Spannvorrichtungen, bei der die eine Seite fest und die andere Seite in vertikaler Richtung beweglich über einen Bolzen gelagert ist, so dass eine vertikale Verschiebung in der Probenmitte stattfinden kann. Um einen definierten Bruch zu erzeugen, werden die Proben vor der Prüfung in der Mitte durch die Einbringung einer Kerbe bearbeitet. Die bewegliche Spannbacke wird durch eine Universalprüfmaschine mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min wegeregelt verfahren. Die Prüfparameter sind in Tabelle 33 dargestellt.

Tabelle 33: Prüfparameter Scherfestigkeitsprüfung mit gerichteten Fasern

Prüfung der Scherfestigkeit auf ZWICK Z400E	
Parameter	Bezeichnung/Wert
Normung	In Anlehnung an ASTM D 5379
Prüfgeschwindigkeit	2 mm/min
Wegmessung	Laserextensometer Fiedler Messelektronik, berührungslos
Vorkraft	40 N
Abbruchkriterium	Statische Last unterhalb 80 % von F_{\max}
Regelung	Lagegeregelt
Herstellungsverfahren	Vakuuminfusionsverfahren mit Ampreg 22 und „Slow“-Härter
Probenform	Gekerbte Quaderprobe (B: 76 mm; D: 15 mm; h: 20 mm)
Probenanzahl	7
Orientierung der Glasfaserstäbe	Quer zur Druckrichtung

Für die Versuche werden die Füllstoffe wie folgt variiert:

- EP-Matrixsystem mit Blähglasgranulatfüllung
- EP-Matrixsystem mit Blähglasgranulatfüllung und 4 Glasfaserstäben
- EP-Matrixsystem mit Blähglasgranulatfüllung und 8 Glasfaserstäben

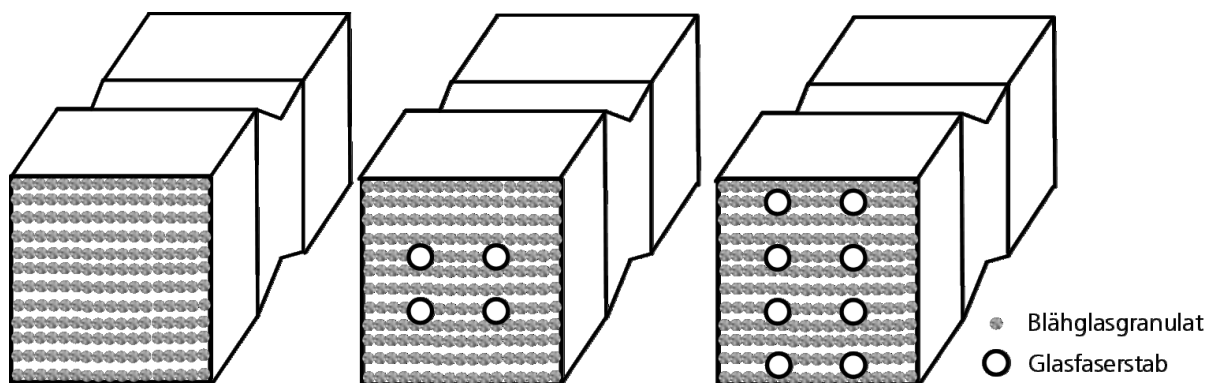


Abbildung 64: Variation der Probekörper für Iosipescu Scherfestigkeitsverfahren (Seitenansicht)

Die Ergebnisse der Versuche (vgl. Abbildung 65) zeigen, insbesondere bei der Variation zwischen den Proben mit und ohne Stäbe, einen variierenden Verlauf im Rissfortschritt. Detektiert wird dies über die einsetzenden Stauchungsverläufe. Während es bei den stablosen Proben nach dem Erreichen der maximalen Scherspannung von 14,9 MPa zu einer Zerstörung der Probe in Form eines durchgehenden Risses des Probekörpers kommt, wird bei den Proben mit Glasfaserstäben nach dem Erreichen der maximalen Scherfestigkeit von 15,3 bzw. 16,8 MPa ein Abfall der Scherspannung ermittelt. Die Probekörper sind nicht vollständig zerstört, da die Glasfaserstäbe nach dem Erreichen des Scherfestigkeitspeaks weiterhin in der Lage sind, Kräfte aufzunehmen.

Dabei können keine signifikanten Änderungen im weiteren Rissfortschrittsverlauf zwischen den 4- und den 8-Stabproben detektiert werden, weshalb die Unterscheidung der Stabproben genauer betrachtet werden muss. Begründet durch die Form der Probekörper, ist es für den Versuch erforderlich, diese mittels einer Kerbung in der Mitte des Probekörpers vorzubereiten. Bei den Probekörpern mit 8 Stäben kommt es zu einer Einkerbung der äußeren Stäbe auf 50 % des Querschnitts, so dass diese vorgeschädigt sind. Die Glasfaserstäbe in den 4-Stabproben werden nicht durch die Kerbung geschädigt. Trotz des Unterschieds in der Stabanzahl ist ein gleichbleibender Verlauf zwischen den 4- und den 8-Stabproben ermittelbar. Einzig die etwas höhere maximale Scherfestigkeit der 8 Stabproben lässt auf ein Resttragverhalten der angekerbten Stäbe schließen.

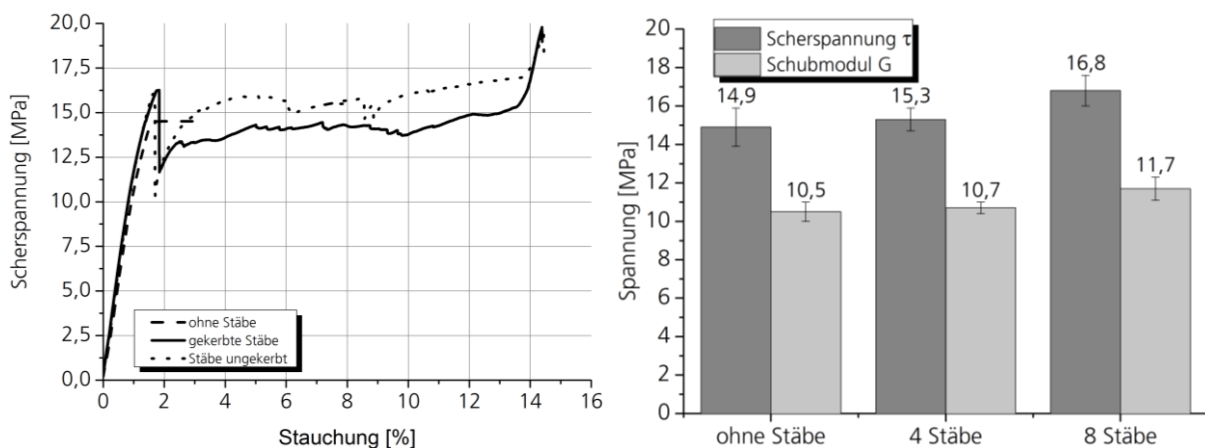


Abbildung 65: Ergebnisse Scherfestigkeitsuntersuchungen nach dem Iosipescu-Verfahren

Folgend wird das Bruchbild der Probekörper genauer betrachtet. Der Verlauf der Scherspannungs-Stauchungskurven der mit Glasfaserstäben verstärkten Proben und das Erreichen eines Peaks mit einem folgenden Abfall der Last zeigt ein gleichbleibendes Versagensbild. Die Ursache dafür liegt im Rissverlauf der Probekörper. Der Riss verläuft ausschließlich durch das kugelförmige Blähglasgranulat, was darauf schließen lässt, dass die innere Festigkeit der Kugeln geringer als die innere Festigkeit des Harzes bzw. die Adhäsionsfestigkeit zwischen Harz und Blähglasgranulat ist. In Abbildung 66 ist der Rissverlauf bildlich dokumentiert. Eine Auswertung der Bruchflächen hinsichtlich der Korngrößen ergibt ebenfalls, dass Probekörper mit größeren Korndurchmessern (zwischen 1,5 und 2 mm) geringere Scherfestigkeiten als Probekörper mit durchschnittlich kleineren Korngrößendurchmessern (1,0 bis 1,5 mm) aufweisen. Damit wird der bereits aus den Druckfestigkeitsuntersuchungen bekannte Effekt, der Schwächung des FKV-Werkstoffs, durch eine Einbringung großer Durchmesser bei dem Blähglasgranulat bestätigt [71, 72].

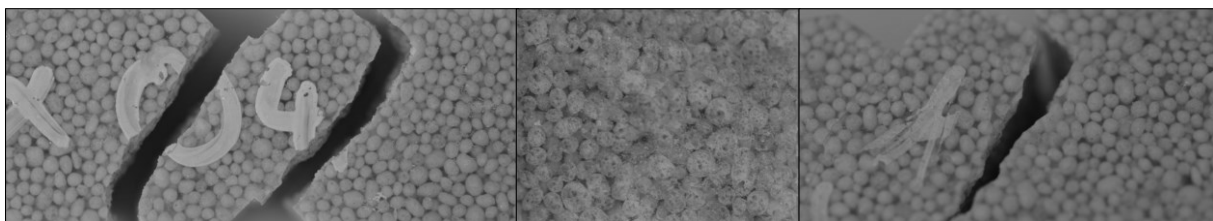


Abbildung 66: Exemplarischer Rissverlauf in Probekörpern der Scherfestigkeitsuntersuchungen

6.4.4 Mediale Alterung

Eine der Hauptanforderungen an Auflagersysteme besteht in der Beständigkeit gegenüber medialen und thermischen Belastungen. Diese Anforderungen entstehen durch die Einbausituation sowie die wechselnden thermischen Bedingungen bei und nach Auf- und Abkühlvorgängen. Um den Anforderungen gerecht zu werden, müssen experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden, mithilfe derer eine Eignung des FKV-Werkstoffs für diese medialen und thermischen Belastungen ermittelt werden kann. Hierzu sollen die folgenden experimentellen Versuche durchgeführt werden:

- Bestimmung der Wasseraufnahme des FKV-Werkstoffs
- Bestimmung des Einflusses von eingeschlossenem, gefrorenem Wasser im FKV-Werkstoff
- Bestimmung des Einflusses gleichzeitiger starker Temperaturunterschiede als Versuch: „Tanksimulation“
- Bestimmung der Materialeigenschaften unter Tieftemperatur bei -163 °C
- Bestimmung des Einflusses variierender Temperaturen im Zyklusverfahren

Nach der medialen und thermischen Belastung werden Druckversuche an den Probekörpern durchgeführt, um einen quantitativen und qualitativen Einfluss zu bestimmen. Die Druckversuche haben, neben der Ermittlung des Verhaltens nach medialen und thermischen Auslagerungen als Ziel, statische und mechanische Abminderungsfaktoren zu bestimmen. Die Abminderungsfaktoren sollen für die Auslegung von FKV-Werkstoffen genutzt werden und sollen eine Schwächung des FKV-Werkstoffs durch mediale und thermische Belastungen berücksichtigen.

6.4.4.1 Wasseraufnahme

Zunächst wird die Wasseraufnahme eines FKV-Werkstoffs bestimmt. Da Schadensfälle mit Holzauflagern bekannt sind, bei denen es zu einem Quellen und Aufplatzen gekommen ist, ist davon auszugehen, dass Wasser eine mediale Belastung in der Einbausituation darstellt.

Die Bestimmung der Wasseraufnahme in Massenprozent [M%] wird nach DIN EN ISO 62 (vgl. Parameter in Tabelle 34) und dem darin beschriebenen Verfahren 1 durchgeführt [94]. Dazu werden kleine Probekörper (Verhältnis Oberfläche zu Volumen von ca. 1:3) aus dem FKV-Werkstoff entnommen, einer Oberflächenbehandlung unterzogen und anschließend dauerhaft für 2 Jahre in vollentsalztem Wasser ausgelagert. Das Wasser verbleibt ohne Wechsel über dem gesamten Versuch im Prüfbehältnis. Es werden drei an den Oberflächen unterschiedlich modifizierte FKV-Werkstoffe ausgelagert, wobei die Proben entweder

- keine Beschichtung,
- eine Harzbeschichtung oder
- eine Gel-Coat-Beschichtung haben.

Zeitlich vor der Auslagerung und in regelmäßigen Abständen während der Auslagerung werden Wägungen der Probekörper durchgeführt, um die Wasseraufnahme zu detektieren.

Tabelle 34: Prüfparameter zur Bestimmung der Wasseraufnahme

Bestimmung der Wasseraufnahme	
Parameter	Bezeichnung/Wert
Normung	DIN EN ISO 62
Dauer	> 2 Jahre
Temperatur Auslagerung	23 °C
Zeitpunkt Wägungen	Unterschiedlich
Messmittel	Kern Feinwaage (Genauigkeit 0,001 g)

Die Ergebnisse in Abbildung 67 zeigen, dass die mit einem Gel-Coat beschichteten Proben die geringste Wasseraufnahme aufweisen. Die Wasseraufnahme des Kunstharzpressholzes liegt zum Vergleich gemäß Datenblatt bei 5 M. [%], ohne eine Angabe darüber zu machen, ob es sich dabei um einen gesättigten Zustand handelt und nach welcher Zeit dieser Zustand erreicht ist. Auch eine Harzbeschichtung wirkt sich reduzierend auf eine Wasseraufnahme aus. Für den Anwendungsfall als Auflagerwerkstoff sollte daher eine Beschichtung des FKV-Werkstoffs vorgesehen werden, wobei auf Grund der Versuche eine Gel-Coat-Beschichtung des FKV-Werkstoffs präferiert wird. Diese Untersuchungen dienen einzig der quantitativen Bestimmung der Wasseraufnahme. Es werden keine zusätzlichen Druckfestigkeitsuntersuchungen an den ausgelagerten Proben nach einer Wasseraufnahme zur Bestimmung des Einflusses auf die mechanischen Eigenschaften durchgeführt. Eine Bewertung des Einflusses des Wassers im Verbundwerkstoff kann daher nicht vorgenommen werden.

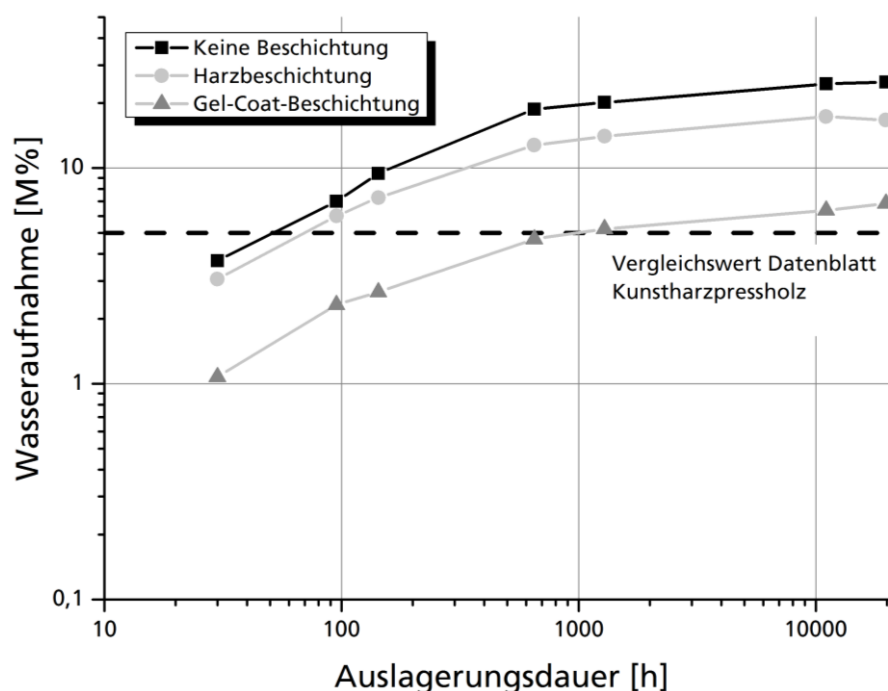


Abbildung 67: Ergebnisse der Wasserauslagerung über 2 Jahre

Bei allen weiteren Untersuchungen werden die Probekörper nach einer medialen/thermischen Auslagerung mechanisch durch eine Druckfestigkeitsuntersuchung getestet, um den Einfluss der Auslagerung auf die mechanischen Eigenschaften des FKV-Werkstoffs zu ermitteln. Folgend werden die einzelnen medialen/thermischen Belastungszyklen dargestellt. Die Ergebnisse der mechanischen Versuche werden nachträglich beschrieben.

6.4.4.2 Einschluss gefrorenen Wassers im FKV-Werkstoff

Neben der einfachen Wasserauslagerung wird der Einfluss gefrorenen, infundierten Wassers in den Probekörper untersucht, was einem ungenügenden Schutz des FKV-Werkstoffs durch eine fehlerhafte Beschichtung entspräche. Dazu werden die Probekörper, wie in Abbildung 68 dargestellt für 72 h bei einer Wassertemperatur von 60 °C (erhöhte Diffusion des Wassers bei erhöhten Temperaturen vgl. Formel Diffusionskoeffizient in [40]) ausgelagert. Anschließend werden die Probekörper für 48 h bei -15 °C eingefroren. Die anschließende mechanische Prüfung der Probekörper wird bei einer Probekörpertemperatur von 0 °C durchgeführt.

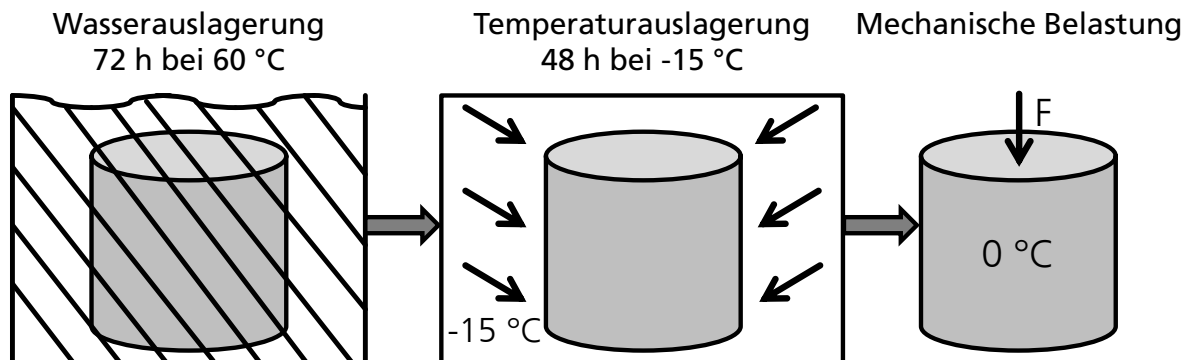


Abbildung 68: Ablaufschema zur Bestimmung des Einflusses von gefrorenem Wasser

Im Ergebnis zeigt sich, dass ein Unterschied darin besteht ob und welche Art einer Beschichtung vorliegt. (vgl. Abbildung 69).

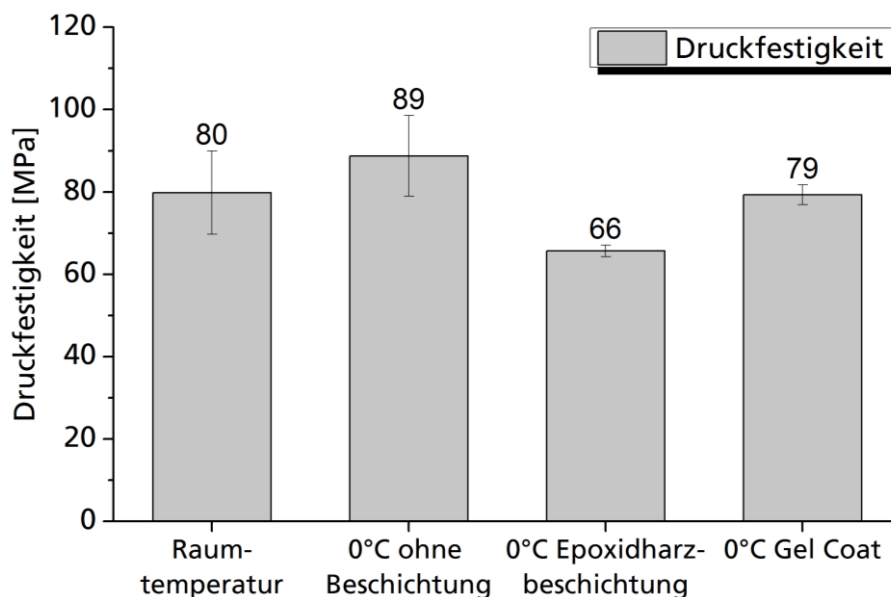


Abbildung 69: Ergebnisse der mechanischen Untersuchung an Probekörpern mit eingefrorenem Wasser

Es können Unterschiede zwischen den einzelnen Beschichtungen ermittelt werden. Die große Streubreite bei den unbeschichteten Proben weist auf einen Einfluss des eingefrorenen Wassers hin, wobei die Gründe dafür nicht erklärt werden können. Die Ergebnisse der Proben mit einer Epoxidharzbeschichtung zeigen nach einer Auslagerung eine reduzierte Festigkeit gegenüber den Referenzproben. Das Aufbringen eines Gel-Coats zeigt nahezu die gleichen Versuchsergebnisse wie die Referenzproben. Dies bestätigt die bereits getroffene Annahme,

dass ein Gel-Coat ein Eindringen von Wasser in den FKV-Werkstoff verhindert. Daher sollte der FKV-Werkstoff mit einem Gel-Coat überzogen werden, um diesen gegen einen Wassereintritt zu schützen.

6.4.4.3 Einfluss starker Temperaturunterschiede als Versuch „Tanksimulation“

Eine weitere zu untersuchende thermische Belastung ist der Einfluss von Temperaturschwankungen um mehr als 150 K. Die Versuche simulieren die starken Temperaturunterschiede, die am Tank herrschen. Der Tank weist durch die Befüllung mit LNG eine Temperatur von -163 °C auf, während die Außentemperaturen je nach Umweltzone Temperaturen zwischen -30 °C und 40 °C aufweisen. Damit sind die Auflagerwerkstoffe gleichzeitigen, starken Temperaturunterschieden ausgesetzt. Der hier durchgeführte Versuch geht von einer Temperaturdifferenz an den Auflagerblöcken von $\Delta K \approx 150\text{ °C}$ aus. Dazu wird, wie in Abbildung 70 dargestellt, ein Versuchstand entwickelt, der die Konditionierung von Probekörpern von zwei Seiten mit einem Temperaturunterschied von $\Delta K = 150\text{ °C}$ ermöglicht.

Sechs Proben können gleichzeitig von zwei Seiten mit zwei unterschiedlichen Temperaturen beaufschlagt werden. Dazu wird der Versuchstand in einen Klimaschrank bei einer konstanten Temperatur von -70 °C installiert. Im Innern des Versuchstands werden die Proben über eine Aluminiumplatte, unter der eine wassergekühlte Heizschleife eingebracht ist, mit einer Temperatur von 80 °C beaufschlagt. Eine Isolierung des Versuchstands verhindert die Abkühlung der Heizung und die gleichzeitige Einbringung von Wärme in den Klimaschrank. Eine Überwachung der Temperaturen während des Versuchs über 10 Tage wird durch 5 Messpositionen gewährleistet [90]. Der Versuchszeitraum ist mit 10 Tagen vergleichsweise kurz gewählt, da die Versuche einen orientierenden Charakter haben sollen, der den Einfluss eines Temperaturunterschieds auf die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe untersucht.

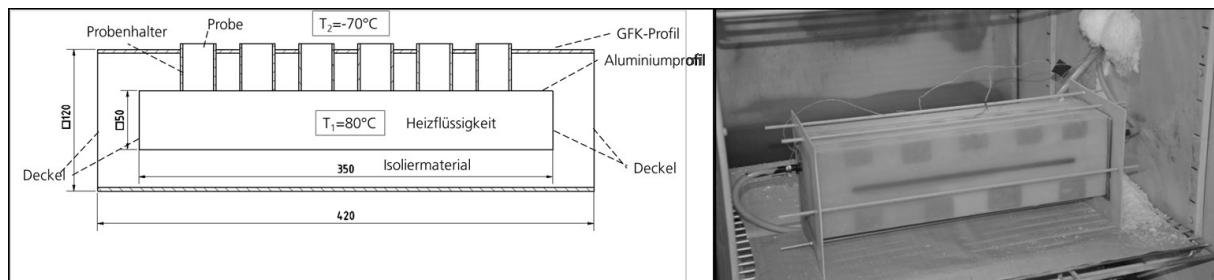


Abbildung 70: Aufbau Versuchstand Tanksimulation [95]

6.4.4.4 Bestimmung der Materialeigenschaften unter Tieftemperatur bei -163 °C

Da die Hauptanforderung für einen Auflagerwerkstoff die Beständigkeit gegenüber tiefkalten Temperaturen (Temperatur Tank -163 °C) ist, wird diese thermische Belastung durch eine Auslagerung der Probekörper in einem Stickstoffbad simuliert. Dabei werden die Proben durch einen Verbleib in einem Stickstoffbad für 15 bis 30 Minuten auf eine Temperatur $< -163\text{ °C}$ abgekühlt. Anschließend werden die Proben, in einem auf -163 °C konditionierten Prüfraum, mechanisch unter einer Druckbelastung nach DIN EN ISO 604 geprüft (vgl. Abbildung 71).

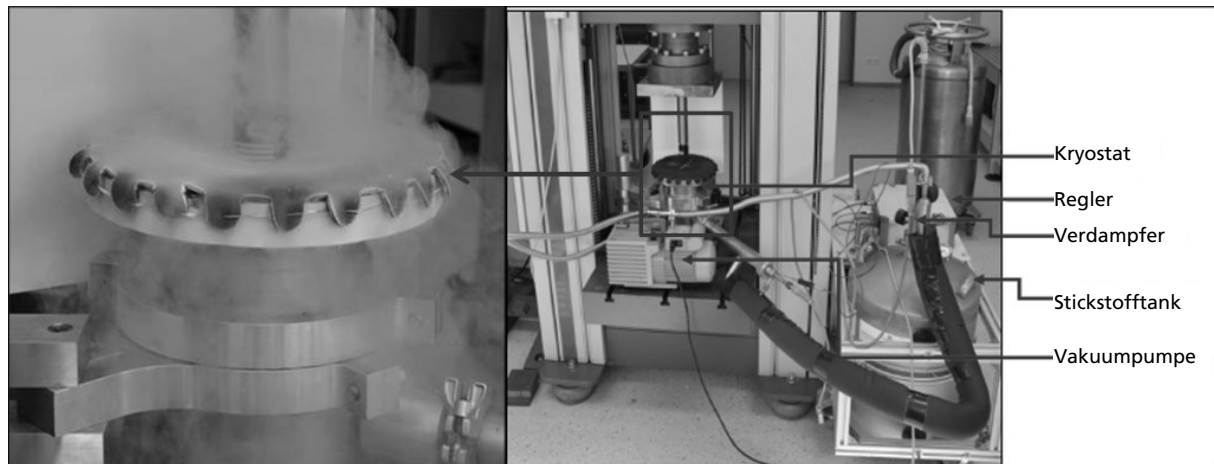


Abbildung 71: Druckversuch an FKV-Werkstoffen bei kryogenen Temperaturen (-163 °C) [90]

6.4.4.5 Einfluss variierender Temperaturen im Zyklusverfahren

Neben der thermischen Belastung durch den tiefkalten Tank (-163 °C), kommt es auf Grund sich verändernder Umgebungsbedingungen zu einer medialen Belastung der Auflager bei einer Ortsveränderung des LNG-Schiffs. Daher wird ein selbstständiger, nicht genormter Klimazyklus entworfen, der sehr viel stärkere thermische Belastungen durch schnellere und dicht aufeinanderfolgende Temperaturänderungen hervorruft, als dies in der Praxis möglich ist. Ebenfalls sind Temperaturen von -70 °C nicht in der Praxis zu erwarten. Für die Untersuchung der FKV-Werkstoffeigenschaften bedeutet dies, dass die Untersuchungen sehr viel anspruchsvoller gegenüber tatsächlich auftretenden Belastungen sind.

Dieser Zyklus basiert auf der grundsätzlichen Annahme, dass das Schiff hauptsächlich in arktischen Gewässern operiert und zweimal im Jahr zu Wartungszwecken oder auf Transportrouten tropische Gewässer (Asien) erreicht. Der Klimazyklus ist, wie in Abbildung 72 dargestellt, aufgebaut und stellt eine komprimierte und beschleunigte Alterung dar. Die Probekörper werden auf eine Temperatur von 50 °C bei einer r.F. von 70 % für 2 h erwärmt. Anschließend werden diese auf -70 °C bei 0 % r.F. abgekühlt. Dies simuliert den Übergang zwischen arktischen und tropischen Gewässern und einer dabei entstehenden Kondenswasserbildung. Der Klimazyklus wird 40-mal wiederholt, so dass dieser Versuch, unter der Annahme einer zweimaligen starken Temperaturänderung pro Jahr, eine beschleunigte Alterung der Auflagermaterialien für eine anvisierte Schiffslebensdauer von 20 Jahren simuliert. Der Versuch wird in einem regelbaren Klimaschrank (CTS 70/350) durchgeführt.

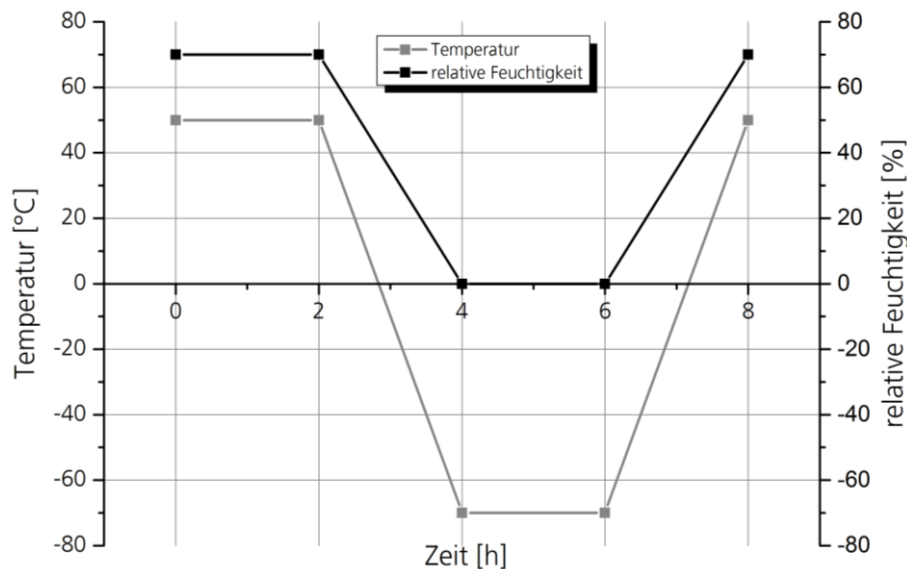


Abbildung 72: Klimazyklus Verlauf

Nach der thermischen und medialen Belastung der Probekörper werden diese mechanischen Druckversuchen unterzogen, mittels derer der qualitative und quantitative Einfluss der Alterungssimulation auf die mechanischen Festigkeiten untersucht werden soll. Die Prüfparameter der durchgeführten Versuche sind nachfolgend in Tabelle 35 dargestellt.

Tabelle 35: Prüfparameter zur Bestimmung des Einflusses medialer Alterung

Bestimmung des Einflusses medialer Alterung mit anschließender Druckfestigkeitsprüfung auf ZWICK Z400E	
Parameter	Bezeichnung/Wert
Normung	In Anlehnung an DIN EN ISO 604
Prüfgeschwindigkeit	5 mm/min
Wegmessung	Laserextensometer Fiedler Messelektronik, berührungslos
Vorkraft	500 N
Abbruchkriterium	Statische Last unterhalb 80 % von F_{\max}
Regelung	Weg geregelt
Herstellungsverfahren	Vakuuminfusionsverfahren mit Ampreg 22 und „Slow“-Härter
Probenform Wasseraufnahme	Quaderproben (B: 15 mm, h 15 mm, T: 15 mm)
Probenanzahl	3 je Serie
Probenform restliche Versuche	Rundprobe (D: 25 mm; H: 22 bis 24 mm)
Probenanzahl	10 je Serie; 6 bei der Tanksimulation
Prüftemperatur	23 °C: bei Wasseraufnahme, Klimazyklus, Tanksimulation -163 °C: bei Druckversuch unter kryogenen Temperaturen
Orientierung der Glasfaserstäbe	In Druckrichtung

Die Ergebnisse zeigen im Vergleich zu den Referenzproben bei den Versuchen unter kryogenen Temperaturen einen Anstieg der Druckfestigkeit um 49 %. Dieses Resultat entspricht den aus der Literatur bekannten Ergebnissen [19, 34]. Die Druckfestigkeiten nach dem durchgeführten Klimazyklus (vgl. Abbildung 72) sind im Vergleich zu den Referenzproben um 11 % reduziert. Das Ergebnis der Tanksimulation zeigt unter Berücksichtigung der einfachen Standardabweichung keine Änderung in der Druckfestigkeit gegenüber den Versuchen unter Raumtemperatur, so dass hier nicht von einem Einfluss durch einen dauerhaften Temperaturunterschied auf die mechanischen Festigkeiten ausgegangen werden kann.

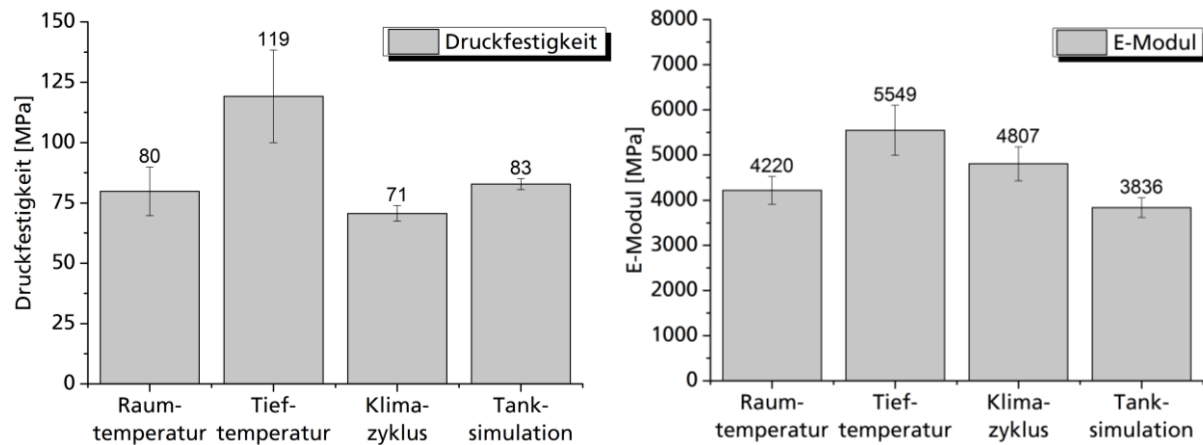


Abbildung 73: Mediale Einflüsse auf die Druckfestigkeit und die Steifigkeit

Ausgehend von diesen Versuchen können Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung einer medialen Belastung des FKV-Werkstoffs abgeleitet werden. Die Abminderungsfaktoren sind definiert als Verhältnis der Mittelwerte der thermisch/medial belasteten Druckfestigkeitsergebnisse zu der Referenzdruckfestigkeit unter Raumtemperatur.

Die Ergebnisse der Abminderungsfaktoren aus dieser Rechnung für mediale Einflüsse auf den FKV-Werkstoff sind wie folgt:

- Tieftemperatur: A_{TT} : 1,5
- Klimazyklus: A_{KL} : 0,9
- Tanksimulation: A_{TS} : 1,0

Der Einsatz eines FKV-Werkstoffs unter Tieftemperatur führt zu einer Erhöhung der mechanischen Festigkeit und der Steifigkeit, so dass dieser Abminderungsfaktor steigernd in die Berechnung eingeht. Der Klimazyklus hingegen wirkt sich festigkeitsmindernd aus, während die Tanksimulation keinen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit hat.

Die Ergebnisse zeigen, dass der FKV-Werkstoff für die hier definierten medialen und thermischen Anforderungen geeignet ist. Für die Festigkeitsberechnung sollten die hier definierten Abminderungsfaktoren berücksichtigt werden.

6.4.5 Schwingfestigkeitsuntersuchungen

Ziel der Schwingfestigkeitsuntersuchung ist die Ermittlung von Erkenntnissen über das Verhalten des FKV-Werkstoffs unter zyklischer, druckschwellender Belastung. Diese Belastung entspricht dem dauerhaften dynamischen Einsatzfall eines Auflagerwerkstoffs in einem LNG-Tankschiff. Mithilfe der Prüfungen sollen Abminderungsfaktoren ermittelt werden, die bei einer Auslegung eines FKV-Werkstoffs für ein Auflagersystem berücksichtigt werden müssen. Da Faserverbundstrukturen unter Druckbelastung bisher wenig praktische Relevanz im Leichtbau haben, existieren keine bzw. sehr wenige Prüfnormen für die Schwingfestigkeitsprüfung, die im Druckbereich genutzt werden können [75]. Aus diesem Grund kann die DIN 50100, welche allgemeine Angaben zu Schwingfestigkeitsuntersuchungen an metallischen Werkstoffen beschreibt, für die Durchführung von Schwingfestigkeitsuntersuchungen als grundsätzliche Normung herangezogen werden. Weitere Hinweise und Vorschläge für die Durchführung der Schwingfestigkeitsuntersuchungen können aus der Prüfung von bewehrungsstahlverstärktem

Beton entnommen werden. Literaturhinweise für Beton sind in HOHBERG [96] und weitere für Duroplaste in HOFMANN [97] zu finden. Auf Grund der ungenügenden Normenlage für die Festlegung von Prüfbedingungen, werden eigene Prüfbedingungen entsprechend der Erfahrung im Umgang mit Schwingfestigkeitsprüfungen an Faserverbundprobekörpern getroffen. Dazu wird ein Versuchsablauf mit den folgenden, in Tabelle 36 dargestellten, Kennwerten erstellt.

Tabelle 36: Prüfparameter zur Bestimmung der Schwingfestigkeit

Ermittlung der dynamischen Eigenschaften	
Parameter	Bezeichnung/Wert
Normung	DIN 50100
Prüfmaschine	Walter+Bai 63 kN, hydraulisch
Spannungsverhältnis	Zyklisch druckschwellend, $R = 0,1$
Regelung	Kraftgeregelt
Prüffrequenz	30 Hz
Prüfdauer	$2 \cdot 10^6$ LW
Prüftemperatur	RT (20-23 °C), Temperatur Probekörper < 40 °C, Proben luftgekühlt
Probenform	Rundproben Ø 25 mm, Länge ca. 22 mm
Probenanzahl	> 10 Probekörper je Serie

Die Versuche werden entsprechend der späteren Belastungssituation als druckschwellende Prüfungen mit einem Spannungsverhältnis R von Oberlast zu Unterlast mit 0,1 durchgeführt und in Form eines doppellogarithmischen Diagramms dargestellt. Als Prüffrequenz wird eine maximale Frequenz von 35 Hz zugelassen, damit eine schnelle Ermittlung von Prüfdaten erfolgen kann. Das Problem der Erwärmung der Proben wird mithilfe einer Druckluftkühlung von 3 bar umgangen, so dass die maximale Temperatur der Probe auf 30 °C ansteigen kann und ein Erreichen des Glasübergangspunktes T_g während der Prüfung verhindert wird. Alle Versuchsserien werden bis zu einer maximalen Lastwechselzahl (LW) von $2 \cdot 10^6$ oder bis zu einem eintretenden Bruch experimentell geprüft und anschließend, wie bei Faserverbundprobekörpern üblich (bspw. GL [98]), bis zu einer LW-Zahl von 10^7 extrapoliert. Die Probenform wird entsprechend der quasistatischen Proben aus der DIN EN ISO 604 als Zylinderprobe abgeleitet.

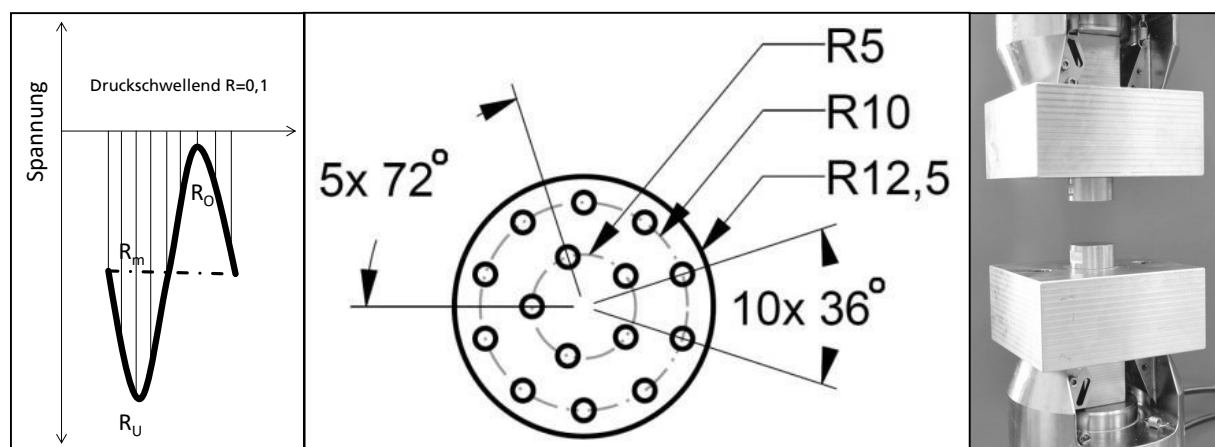


Abbildung 74: Schwingungsverhältnis, Aufbau und Probenform für die Ermittlung der dynamischen Schwingfestigkeit

Die Untersuchungen zur Schwingfestigkeit umfassen vier Serien mit jeweils variierenden Materialkombinationen. Neben den Materialkombinationen werden zwei Serien vor einer

Prüfung thermisch/medial ausgelagert, wobei die Auslagerungen unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt werden. Die folgenden Serien werden dynamisch geprüft:

- **Referenzproben** - FKV-Werkstoff mit 9 Glasfaserstäben (\varnothing 2 mm) und Blähglasgranulat (\varnothing 1 bis 2 mm)
- **Reduzierte Stabanzahl** - FKV-Werkstoff mit 5 Glasfaserstäben (\varnothing 2 mm) und Blähglasgranulat (\varnothing 1 bis 2 mm)
- **Klimazyklus** - FKV-Werkstoff nach thermischer Auslagerung bei $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (vgl. Zyklusverfahren - in mediale Alterung)
- **Tanksimulation** - FKV-Werkstoff nach thermischer Auslagerung mit zwei zeitgleichen statischen Temperaturniveaus (vgl. Tanksimulation in mediale Alterung)

Nachfolgend werden die einzelnen Versuchsreihen ausgewertet und abschließend der Vergleich zwischen den Untersuchungen dargestellt. Beginnend werden die Referenzproben untersucht. Die Ergebnisse zeigen einen Wöhlerkurvenanstieg von $k = 32,6$ (vgl. Abbildung 75). Der Anstieg der Wöhlerkurve weicht stark von denen aus der Literatur [98] bekannten Anstiegen bei zugschwellenden Schwingfestigkeitsuntersuchungen an FKV-Werkstoffen mit $k = 10$ ab. Der k -Wert von $32,6$ weist auf einen Verlauf der dynamischen Belastung mit einem gutmütigen langsamen Brucheintritt hin. Weiterhin kann selbst bei einer hohen Lastamplitude ein später Schadenseintritt erwartet werden.

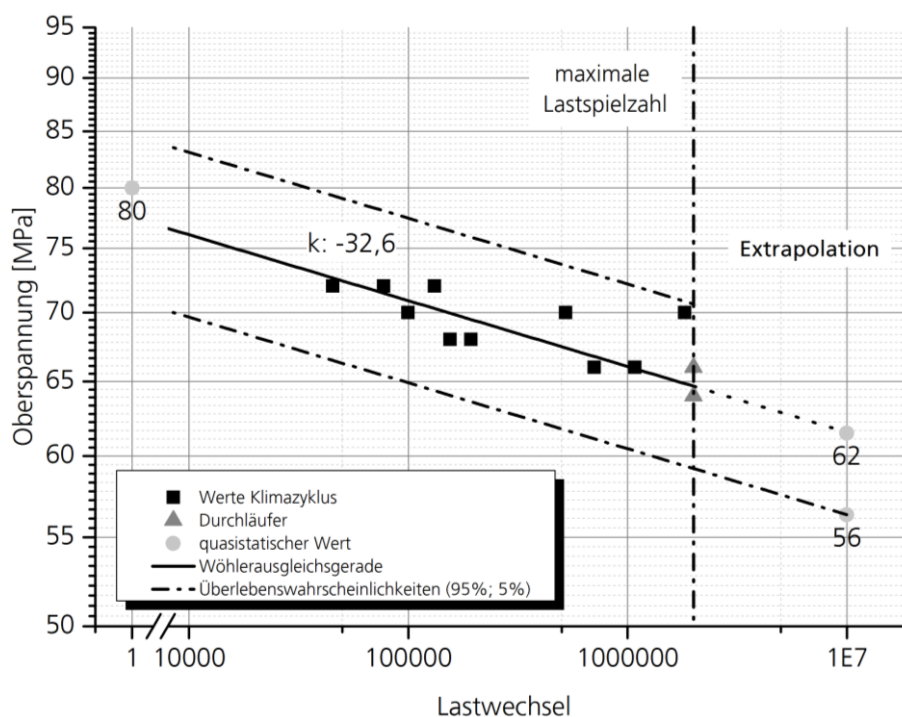


Abbildung 75: Wöhlerkurve Referenzproben

Zur Ermittlung des Einflusses der gerichteten Glasfaserstäbe wird die Anzahl der Stäbe im Vergleich zu den Referenzproben um ca. 45 % reduziert. Die ermittelten Ergebnisse zeigen einen Wöhlerkurvenanstieg von $k = 12,4$, (vgl. Abbildung 76). Dieser Anstieg entspricht damit nahezu dem aus der Literatur [98] bekannten Anstieg von $k = 10$.

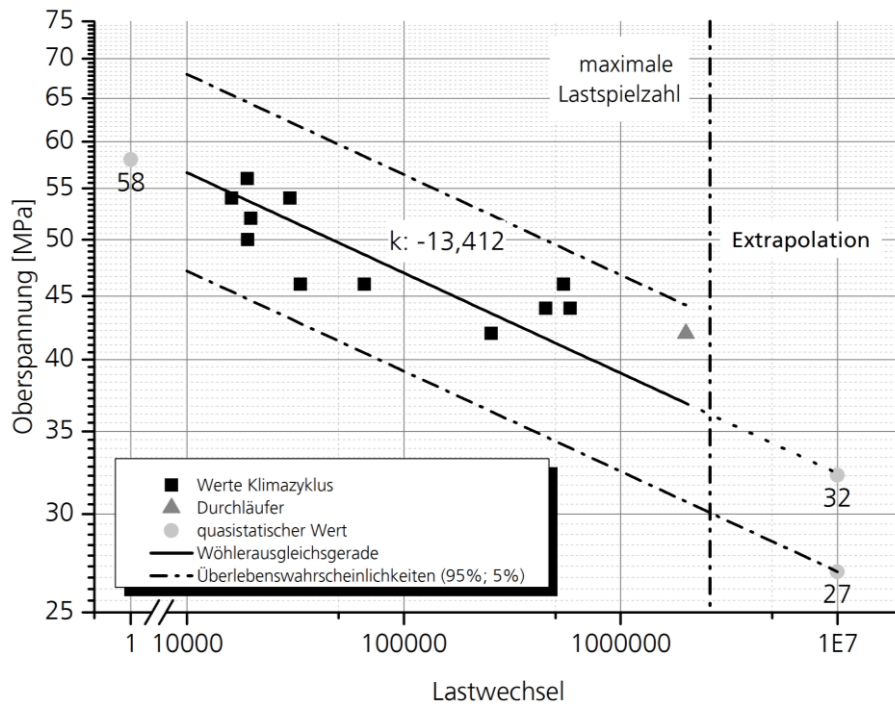


Abbildung 76: Wöhlerkurve reduzierte Stabanzahl

Die Schwingfestigkeitsuntersuchungen nach einer Klimazyklus-Auslagerung (vgl. Abbildung 77) ergeben einen Anstieg der Wöhlerkurve von 13,4. Es kann nur ein sehr kleiner Spannungsbereich bei gleichzeitig starker Streuung der LW-Zahlen geprüft werden, da nur dieser Bereich eine Dauerfestigkeit aufweist ohne im Bereich der Kurzzeitfestigkeit oder eines Durchläufers zu liegen.

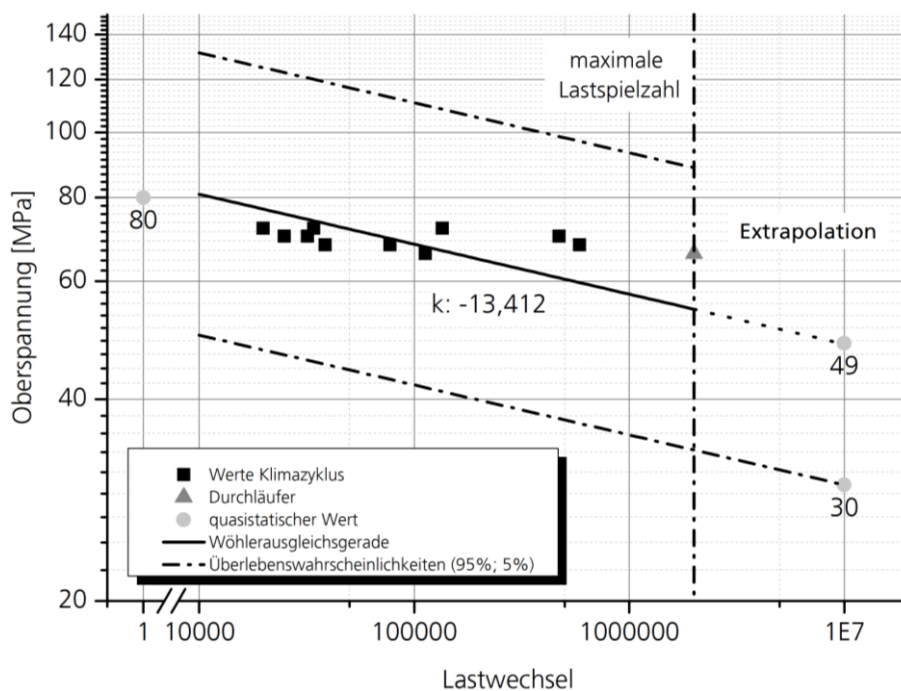


Abbildung 77: Wöhlerkurve Klimazyklus

Die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsuntersuchungen (vgl. Abbildung 78) nach einer medialen Auslagerung (Tanksimulation) ergeben einen Anstieg von 28,0. Dieser Anstieg weicht stark von

denen aus der Literatur [98] bekannten Werten, mit $k = 10$ ab und lässt auf ein gutmütiges Schädigungsverhalten schließen.

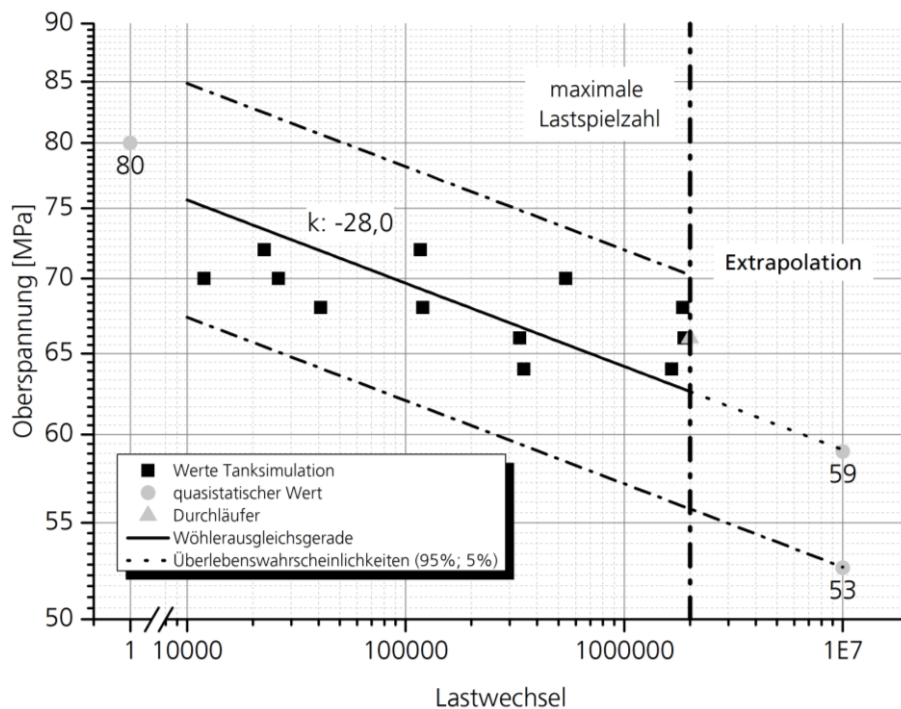


Abbildung 78: Wöhlerkurve Tanksimulation

Eine zusammenfassende Darstellung (vgl. Abbildung 79) der Schwingfestigkeitsuntersuchungen ergibt, dass eine Reduktion der Stäbe um 45 % zu einem steileren Anstieg der Wöhlerkurven und damit zu einem schnelleren Versagen der Probekörper führt.

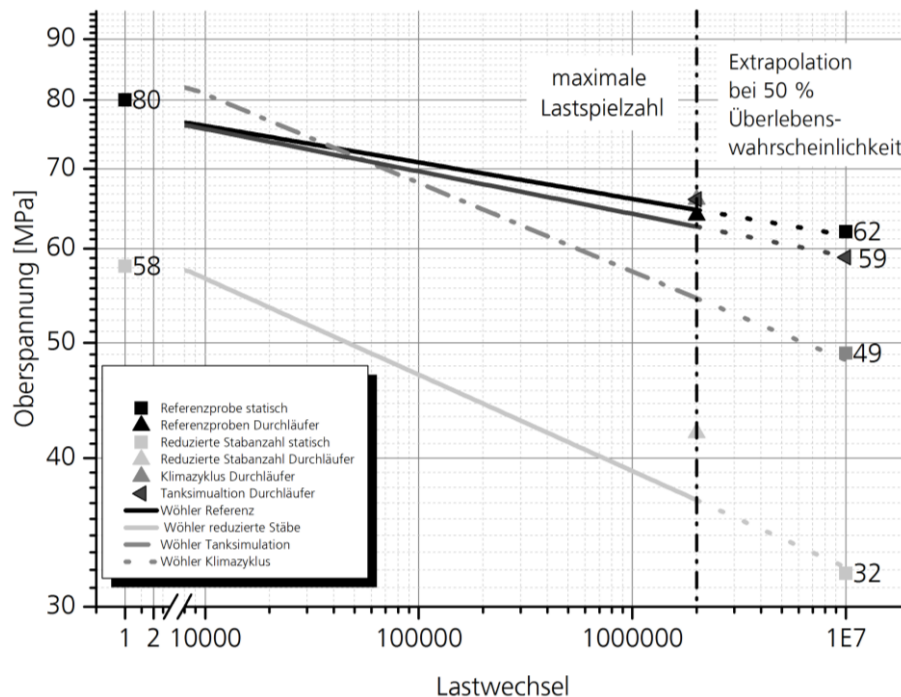


Abbildung 79: Vergleich der Wöhlerkurvenanstiege

Der Auflagerwerkstoff versprödet aufgrund einer geringeren Glasfaserstabanzahl und einem erhöhten Volumenanteil an Blähglasgranulat. Die mediale Alterung durch einen Klimazyklus hat starke Auswirkungen auf die Schädigung. Der Bereich zwischen eintretendem Bruch und Durchläufer liegt sehr nah beieinander, was möglicherweise auf eine ungleichmäßige und unterschiedlich starke Schädigung der einzelnen Proben durch den Klimazyklus zurückzuführen ist. Dies ist insbesondere durch die unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten¹¹ und auf einen Wassereintritt über trockene Stellen in den Probekörper zurückführbar. Die thermische Belastung einer Tanksimulation weist keine starke Änderung zu Referenzstäben auf, was auf eine gleichmäßige Belastung durch konstante statische Temperaturen zurückzuführen sein kann. Demnach haben konstante Temperaturen weniger Einfluss auf die Schwingfestigkeit als wechselnde Beanspruchungen mit Kondenswasserbildung und Wasserdiffusionsvorgängen.

Aus den Schwingfestigkeitsuntersuchungen, der Extrapolation der Wöhlerkurven bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 % und 95 % sowie den statischen Versuchen können nun Abminderungsfaktoren erstellt werden. Es zeigen sich die folgenden in Abbildung 80 dargestellten Abminderungen. Diese werden zwischen den Bruchlasten aus den quasistatischen Versuchen sowie aus den extrapolierten LW-Zahlen bis $1 \cdot 10^7$ bestimmt.

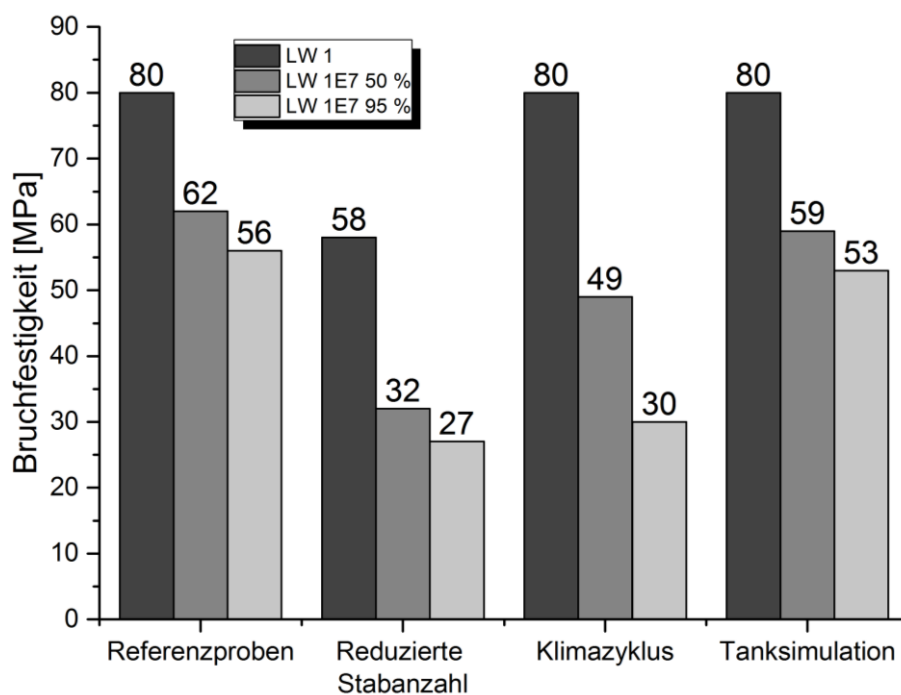


Abbildung 80: Ermittlung von Abminderungsfaktoren in Folge einer schwingenden Beanspruchung

Die Abminderungsfaktoren bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 % und 95 % sind:

- | | | | | |
|--------------------------|---------------|-----|---------------|-----|
| • Referenzstäbe: | $A_{R50\%}$: | 0,8 | $A_{R95\%}$: | 0,7 |
| • Reduzierte Stabanzahl: | $A_{r50\%}$: | 0,6 | $A_{r95\%}$: | 0,5 |
| • Klimazyklus: | $A_{K50\%}$: | 0,6 | $A_{K95\%}$: | 0,4 |
| • Tanksimulation: | $A_{T50\%}$: | 0,7 | $A_{T95\%}$: | 0,7 |

¹¹ Die Oberfläche kann mit Harz versiegelt oder bedingt offenzellig durch trockene nicht mit Harz getränkte Stellen sein.

6.4.6 Wärmeleitfähigkeit

Die Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit stellt die Hauptuntersuchung bei der Entwicklung eines FKV-Werkstoffs für ein Auflagersystem dar. Da die Auflager neben dem Abtrag der mechanischen Lasten vor allem als Isolator wirken, muss deren Isolationswirkung untersucht werden. Zur Bestimmung dieser wird die Wärmeleitfähigkeit λ [W/m·K] ermittelt, die mithilfe des Zweiplattenverfahrens nach DIN EN 12667 bestimmt wird [99, 100].

Beim Zweiplattenverfahren wird ein plattenförmiger Probenkörper, dessen Dicke und Gesamtvolumen bekannt ist, zwischen zwei temperierten Platten positioniert. Die temperierten Platten besitzen konstante Temperaturen. Dabei weist die obere Platte in den hier durchgeführten Versuchen Temperaturen von ca. 45 °C/35 °C/25 °C/15 °C und die untere Platte Temperaturen von 35 °C/25 °C/15 °C/ 5 °C auf. Die Messungen werden bei unterschiedlichen Temperaturen, da die Wärmeleitfähigkeit temperaturabhängig ist [40 bis 42], aber bei gleichbleibenden Temperaturdifferenzen ΔK durchgeführt. Anschließend wird der Wärmestrom, der durch die unterschiedlichen Temperaturen und durch den plattenförmigen Probekörper fließt, gemessen und entsprechend der unterschiedlichen Temperaturen gemittelt. Zusätzlich werden die Ränder des Probenmaterials mit Styropor isoliert, um Randeinflüsse und ungewollte Wärmeströmungen zu verhindern. Durch eine Rückrechnung des Wärmestroms mithilfe der Formel 14 kann auf die Wärmeleitfähigkeit λ des zu messenden Materials geschlossen werden. Der Prüfaufbau ist nachfolgend schematisch in Abbildung 81 dargestellt.

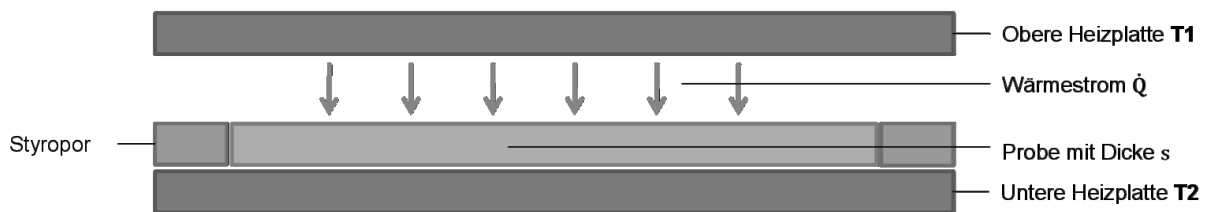


Abbildung 81: Schematische Darstellung des Zweiplattenverfahrens

Die Ergebnisse der Versuche im Zweiplattenverfahren sowie die Kennwerte der Prüfung sind in Abbildung 82 und Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 37: Prüfparameter zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Zweiplattenverfahren

Prüfung der Wärmeleitfähigkeit Zweiplattenverfahren	
Parameter	Wert
Normung	DIN EN 12667
Temperaturdifferenz ΔK	9,3 bis 9,6 K
Prüfgerät	TLP 300 - DTX-1P
Herstellungsverfahren	Vakuuminfusionsverfahren mit Ampreg 22 und „Slow“-Härter
Probenform	Platten-Quaderprobe (B: 300 mm; D: 300 mm; h: 37 mm)
Probenanzahl	1 Probe je Zusammensetzung mit Füllstoffen

Die Untersuchungen im Zweiplattenverfahren beschränken sich auf die folgenden FKV-Werkstoffkombinationen:

- Kunstharzpressholz (Furnier horizontal)
- Epoxidharz Ampreg 22 mit Härter-„Slow“
- Epoxidharz mit Blähglasgranulat 1,0 bis 2,0 mm Durchmesser

- Verbundwerkstoff: EP-Matrixsystem mit Blähglas 1,0 bis 2,0 mm Durchmesser und GFK-Stäben vertikal (FVG-Glasfaserstäbe 9,2 Vol. [%])
- Epoxidharz mit Blähglas 1,0 bis 2,0 mm Durchmesser und GFK Stäbe horizontal

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 82 dargestellt.

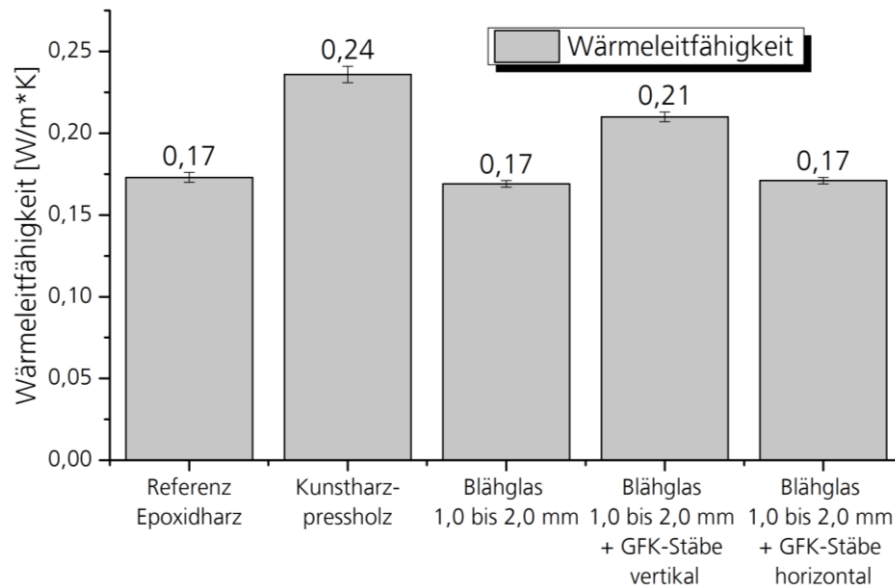


Abbildung 82: Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsuntersuchungen im Zweiplatten-Verfahren

Der Einsatz eines FKV-Werkstoffs führt zu einer Reduktion der Wärmeleitfähigkeit um ca. 12 % gegenüber dem bisherigen Auflagermaterial aus Kunstharzpressholz. Die Füllstoffe sind in einer Parallelschaltung aus Blähglasgranulat sowie Glasfaserstäben in vertikaler Richtung angeordnet. Ebenfalls kann gezeigt werden, dass das Einbringen von Blähglasgranulat einen positiven Einfluss auf die Reduktion der Wärmeleitfähigkeit gegenüber einem ungefüllten EP-Matrixsystem aufweist. Bei einer horizontalen Anordnung der Stäbe und damit einer Reihenschaltung zwischen Blähglasgranulat und Glasfaserstäben werden keine Unterschiede zu den Proben, die allein mit Blähglasgranulat gefüllt sind, festgestellt.

Basierend auf den Versuchsergebnissen soll als Werkstoff für ein Auflager die Kombination aus EP-Matrixsystem mit Blähglasgranulat (Durchmesser 1 bis 2 mm) und Glasfaserstäben in vertikaler Richtung und einem Faservolumengehalt (FVG) von ca. 9,2 % gewählt werden. Dieser Werkstoff ermöglicht die Reduktion der Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zum Kunstharzpressholz.

6.4.7 Wärmeausdehnungskoeffizient

Auf Grund der starken Temperaturunterschiede, die durch Auf- und Abkühlvorgänge an dem Tanksystem auftreten, entstehen in den Materialien Ausdehnungen bzw. Schrumpfungen. Um den Einfluss dieser Belastung auf die Auflagerwerkstoffe zu ermitteln, soll der Wärmeausdehnungskoeffizient mithilfe eines Dilatometers entsprechend der in Tabelle 38 dargestellten Versuchsparameter ermittelt werden.

Tabelle 38: Prüfparameter zur Ermittlung des Wärmeausdehnungskoeffizienten

Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten	
Parameter	Bezeichnung/Wert
Normung	DIN 53752
Temperatur min.	-30 °C
Temperatur max.	30 °C
Temperaturintervalle	5 K
Aufheizzeiten zw. Intervallen	20 min
Haltezeiten zw. Intervallen	30 min
Probenform	Quader mit 1 Glasfaserstab und Blähglasgranulat mit einem Durchmesser von 1-2 mm
Probenanzahl	5 Probekörper

Es zeigt sich, dass der Wärmeausdehnungskoeffizient ab einer Temperatur von -5 °C bei durchschnittlich $17,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}$ liegt (Abbildung 83). Im Temperaturbereich bis -5 °C sind Abweichungen und Ausdehnungskoeffizienten unterhalb von $17 \cdot 10^{-6} \text{ K}$ ermittelbar. Die Schwankungen sind auf die Auflösung der Messuhren zurückzuführen. Die Messuhr löst mit einer Genauigkeit von 0,001 mm auf. Der FKV-Werkstoff weist damit für einen glasfaserverstärkten Kunststoff einen typischen Wert auf. Vergleichswerte liegen zwischen $10\text{-}20 \cdot 10^{-6} \text{ K}$ bei einem FVG > 20 % [19]. Der Wert liegt damit im Bereich des Tankmaterials Stahl (10 bis $15 \cdot 10^{-6} \text{ K}$) und verursacht bei der Auf- und Abkühlung keine Spannungsprobleme.

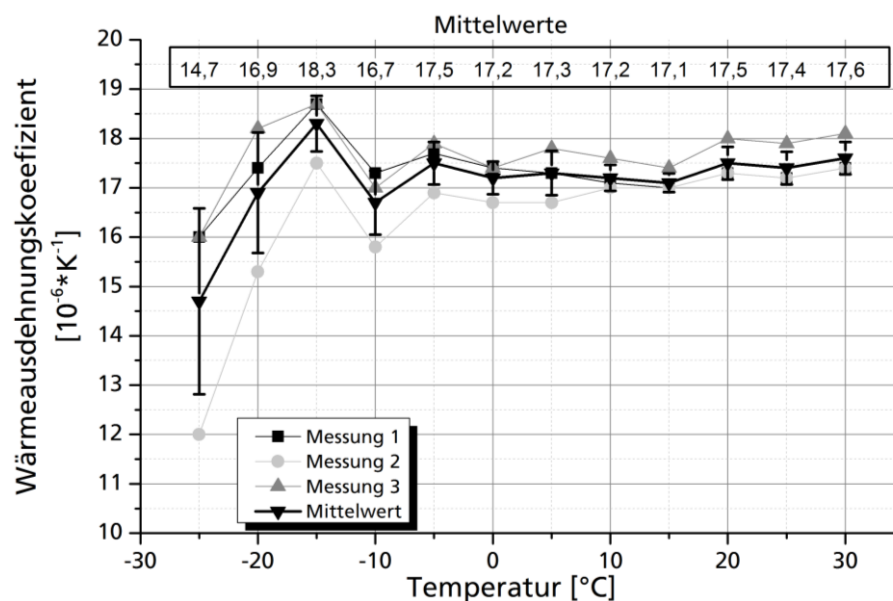


Abbildung 83: Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten an dem FKV-Werkstoff bei variierenden Temperaturen

6.4.8 Faservolumengehalt

Die Bestimmung des FVG ist ein geeignetes Kriterium zur Überwachung einer reproduzierbaren Fertigung von Faserverbundbauteilen. Weiterhin liefert die Bestimmung des FVG Informationen, die für eine analytische Modellbildung und -berechnung erforderlich sind. Zur Bestimmung des FVG wird eine thermische Kalzinierung an Probekörpern n Anlehnung an DIN EN ISO 1172 (vgl. Tabelle 39) durchgeführt. Nach einer Trocknung bei 110 °C für 20 h werden die Probekörper für ca. 20 Minuten in einem Muffelofen bei einer Temperatur von 625 °C thermisch zersetzt, so dass die anorganischen Bestandteile, in Form von Glasresten verbleiben (vgl. Abbildung 84). Die

Bestimmung des FVG erfolgt über eine Wägung vor und nach der thermischen Zersetzung. Über das Verhältnis der Masse zum Volumen und der Dichte wird eine Bestimmung des Anteils an anorganischen Füllstoffen vorgenommen (vgl. Formel 20).

Tabelle 39: Prüfparameter zur Bestimmung des Faservolumengehalts

Bestimmung des Faservolumengehalts	
Parameter	Bezeichnung/Wert
Normung	DIN EN ISO 1172
Trocknungszeit	20h
Trocknungstemperatur	110 °C
Trockenofen	Memmert UNB 400
Glühofen	Carbolite AAF 11/7
Glühtemperatur	625 °C
Glühdauer	Insgesamt 30 min
Probenform	Quaderproben mit einem Gewicht > 2 g
Probenanzahl	5 Probekörper

Da die Proben mit unterschiedlichen Füllstoffen hergestellt werden, deren Volumengehalte unbekannt sind, muss das Verfahren zur Bestimmung des FVG variiert werden.

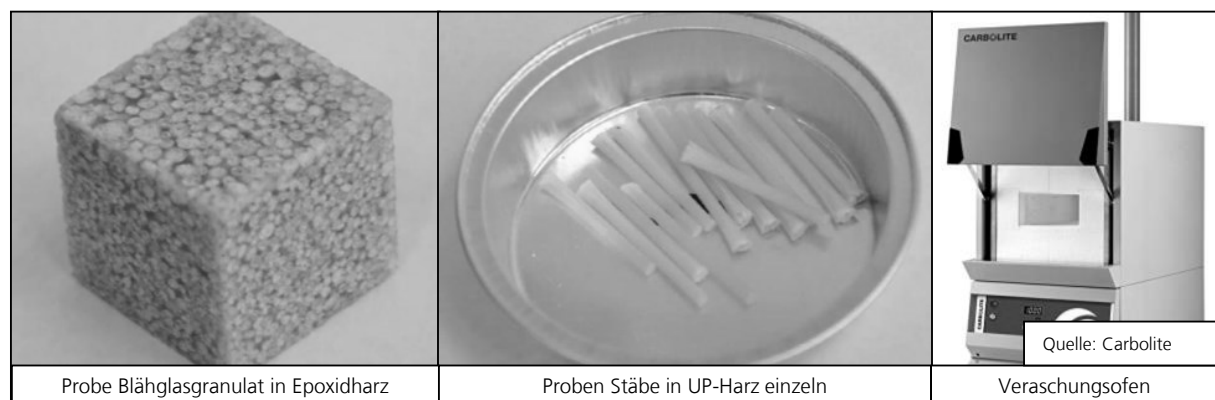


Abbildung 84: Proben für thermische Zersetzung und Muffelofen

Die Zusammensetzung des angestrebten Verbundprobekörpers setzt sich aus den folgenden, in Formel 21 dargestellten, Volumen-Prozent-Anteilen und Komponenten zusammen.

Formel 21: Zusammensetzung des angestrebten Verbundprobekörpers

$$V_{ges} = V_{Harz} + V_{Poren} + V_{Blähglas} + V_{Fasern}$$

Auf Grund der Zusammensetzung der Probekörper ist eine einfache Bestimmung des Faservolumengehalts durch eine Kalzinierung der vollständigen Verbundprobekörper aus Matrix, Blähglasgranulat und GFK Stäben nicht direkt möglich. Die Bestimmung teilt sich auf in eine:

- experimentelle Bestimmung des FVGs mehrerer Proben aus Epoxidharz und Blähglasgranulat sowie eine
- rechnerische Bestimmung der Einzelanteile im Verbundprobekörper.

Die Ermittlung der Volumenanteile für Proben aus EP-Matrix und Blähglasgranulat ergibt für die Bestandteile Harz, Glas und Poren (eingeschlossene Luft in Blähglasgranulat) die folgende in Abbildung 85 dargestellte Verteilung.

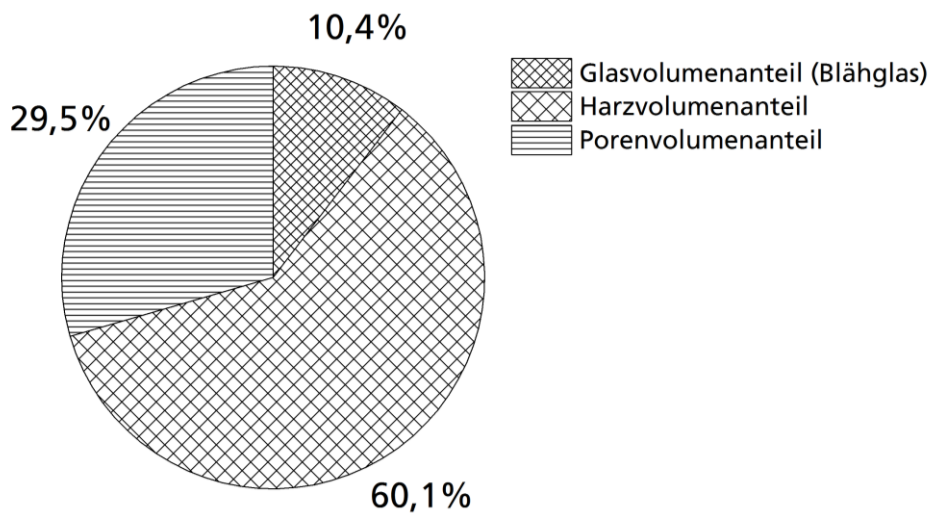


Abbildung 85: Zusammensetzung des Probekörpers aus Epoxidharz und Blähglasgranulat

Als Voraussetzung für die rechnerische Bestimmung der Anteile im FKV-Werkstoff werden die Glasfaserstäbe als ein Körper, bestehend aus Harz und Glasfasern, angenommen. Dadurch lassen sich die geometrischen Abmaße der Stäbe ebenso wie die zylindrische Form der Probenkörper berechnen. Im untersuchten Fall ergibt sich ein Volumenanteil an Stäben von 9,2 Vol. [%] im FKV-Werkstoff. Davon ausgehend teilen sich die restlichen 90,8 Vol. [%] des Verbundprobekörpers auf die Anteile Harz, Blähglasgranulat und Poren auf. Mit der experimentellen Bestimmung zur Zusammensetzung des Probekörpers können die restlichen Vol. [%] Anteile bestimmt werden. Diese werden durch eine Multiplikation der Einzelanteile bezogen auf die verbleibenden 90,8 Volumen-Prozent-Anteile bestimmt. Das Ergebnis dieser Berechnung und damit der Füllstoffanteil im FKV-Werkstoff sind in Abbildung 86 dargestellt.

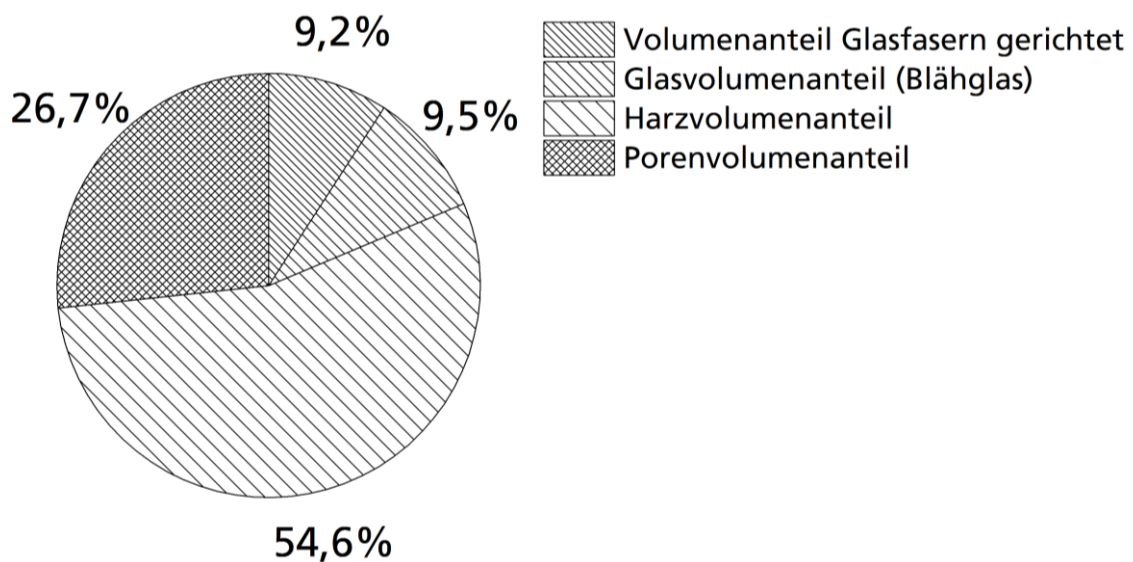


Abbildung 86: Zusammensetzung der Volumen-Prozent-Anteile des Verbundprobekörpers

Die Ergebnisse sind auf Grund eines gleichbleibenden Fertigungsverfahrens mit der Vakuuminfusion reproduzierbar, so dass diese ebenfalls für eine analytische Modellberechnung geeignet sind.

6.4.9 Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen werden, wie in Abbildung 87 dargestellt, zusammengefasst. Im Rahmen der Druckfestigkeitserhöhung können gute mechanische Eigenschaften durch die Einbringung von Glasfaserstäben ermittelt werden. Der Durchmesser des Blähglasgranulats wirkt sich direkt auf die mechanischen Festigkeiten mit dem Ergebnis aus, dass größere Durchmesser beim Blähglasgranulat zu einer stärkeren Schwächung des EP-Matrixsystems führen. Eine Untersuchung der Langzeitdruckfestigkeit ergibt, dass es zu keinen signifikanten Retardationsvorgängen bei einer Druckbeanspruchung im FKV-Werkstoff kommt. Die Untersuchungen der Scherfestigkeit ergeben, dass das Einbringen von Glasfaserstäben zu einer Erhöhung der Scherfestigkeit führt. Ebenfalls kann der festigkeitsmindernde Einfluss des Blähglasgranulats mit steigender Durchmessergröße festgestellt werden. Die mediale Alterung der FKV-Werkstoffproben zeigt, dass eine Versiegelung des FKV-Werkstoffs mit einem Gel-Coat zu einer Reduktion der Wasseraufnahme führt. Eine Beschichtung des FKV-Werkstoffs mit einem Gel-Coat senkt das durch einen Wassereintritt verursachte Schadenspotenzial. Die Nutzung des FKV-Werkstoffs unter Tieftemperatur führt zu einer mechanischen Festigkeitssteigerung bei einer Drucklast. Damit bestätigen sich die in den DMA-Untersuchungen ermittelten Ergebnisse. Es kann kein festigkeitsmindernder Einfluss durch eine dauerhafte Belastung des FKV-Werkstoffs mit zwei Temperaturen zur selben Zeit ermittelt werden. Die Alterung des FKV-Werkstoffs durch einen Klimazyklus mit stark wechselnden Temperaturen und Feuchtigkeiten hat einen festigkeitsmindernden Einfluss. Auf Grund der ermittelten Ergebnisse können statisch, mechanische Abminderungsfaktoren für die analytische Modellbildung abgeleitet werden.

Die druckschwellenden Schwingfestigkeitsuntersuchungen haben als Ergebnis, dass die Einbringung von Glasfaserstäben zu einem gutmütigen und langsamen Schadensverlauf führt. Eine Reduktion der Glasfaserstäbe führt zu einer Versprödung des FKV-Werkstoffs mit einer einhergehenden schneller einsetzenden Schädigung. Auch eine mediale und thermische Belastung der Probekörper vor den Schwingfestigkeitsuntersuchungen führt zu einer Reduktion der Festigkeit. Aus den Ergebnissen können Abminderungsfaktoren für eine Berechnung der Ermüdungsfestigkeit abgeleitet werden.

Die Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit ergeben, dass mithilfe eines modifizierten EP-Matrixsystems eine Senkung der Wärmeleitfähigkeit erreicht werden kann. Es kann eine Reduktion der Wärmeleitfähigkeit gegenüber dem Kunstharzpressholz und einem ungefüllten EP-Matrixsystem durch die Einbringung von Blähglasgranulat erreicht werden. Die zusätzliche Einbringung von Glasfaserstäben führt zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit. Der Wärmeausdehnungskoeffizient des FKV-Werkstoffs liegt etwas oberhalb des Wärmeausdehnungskoeffizienten von Stahl. Daher sind bei einer Ausdehnung oder Schrumpfung des Stahltanks im Entlade- oder Füllprozess geringe bis keine Eigenspannungen im FKV-Werkstoff zu erwarten. Die Bestimmung des Faservolumengehalts ergibt, dass mit dem Vakuuminfusionsverfahren eine reproduzierbare Fertigung mit gleichbleibenden Anteilen der Füllstoffe gewährleistet werden kann. Die FVG-Zusammensetzung kann daher für ein analytisches Berechnungsmodell genutzt werden.

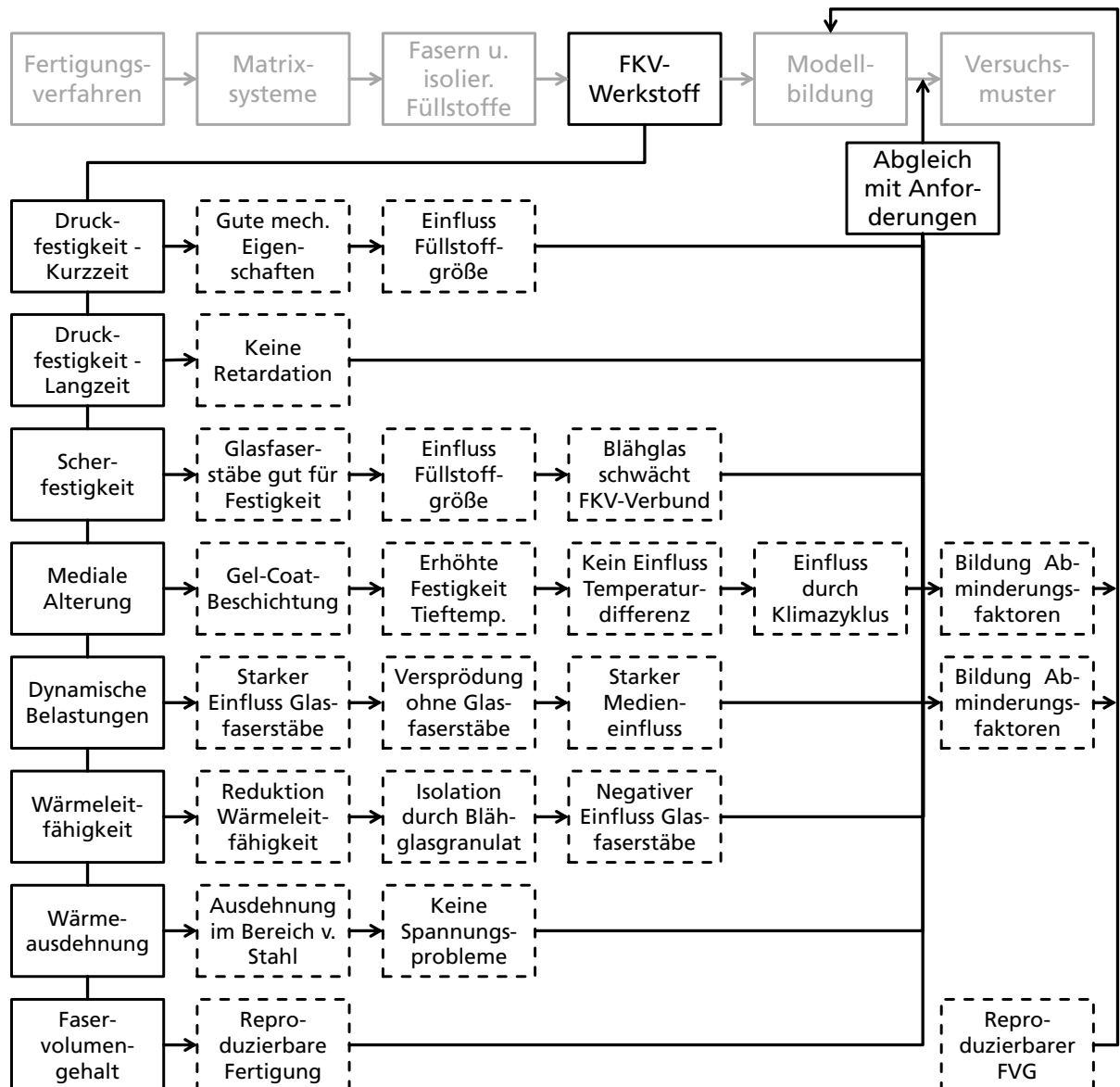


Abbildung 87: Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen

7 Verifizierung analytischer Modelle mit experimentellen Untersuchungen

Ziel des folgenden Kapitels ist die Ermittlung einer optimalen Werkstoffzusammensetzung des FKV-Werkstoffs für die Nutzung als LNG-Auflager. Dieses Ziel soll mithilfe von aus der Literatur bekannten, analytischen Modellen für FKV erreicht werden. Die Genauigkeit und Eignung der genutzten Modelle ist für den entwickelten FKV-Werkstoff nicht bekannt und muss erprobt werden. Die Verifizierung der analytisch berechneten Ergebnisse soll mithilfe der experimentellen Untersuchungen stattfinden. Weisen die Modelle eine ausreichende Genauigkeit auf, sollen diese ferner Aufschluss über die Eigenschaften des FKV-Werkstoffs bei unterschiedlichen Füllstoffzusammensetzungen geben. Dadurch kann der FKV-Werkstoff hinsichtlich der Festigkeit und der Wärmeleitung an Einsatzbedingungen angepasst werden ohne die Durchführung erneuter aufwendiger Versuchsreihen.

Für die Steifigkeits- und Festigkeitsberechnung wird die Mischungsregel bzw. ein aus der Mischungsregel abgeleiteter Ansatz von KRIMMER [101] für Faserverbundwerkstoffe angewendet. Eine Verifizierung der thermischen Isolationseigenschaften soll mithilfe eines rechnerischen Ansatzes nach KNAPPE [102, 103] erbracht werden (vgl. Abbildung 88).

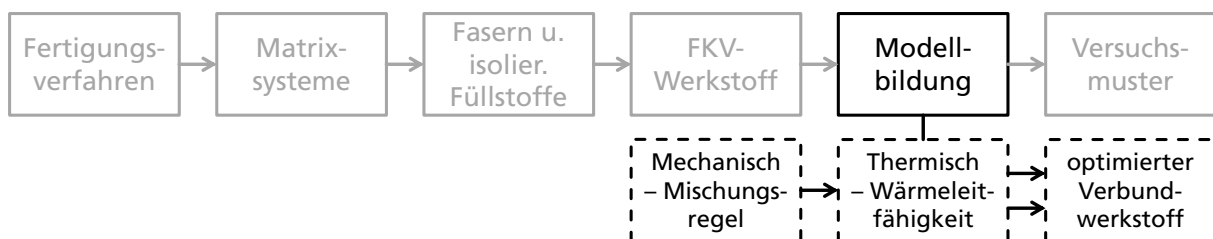


Abbildung 88: Übersicht analytischer Berechnungsmodelle

7.1 Analytisches Berechnungsmodell nach der Mischungsregel für mechanische Belastungen

Die Kenntnis der Zusammensetzung des FKV-Werkstoffs ermöglicht Berechnungen mit der Mischungsregel [34]. Mithilfe dieser lassen sich Steifigkeiten von FKV-Werkstoffen mit unterschiedlichen Füllstoffgehalten berechnen. Die Mischungsregel betrachtet den FKV in der Mikroebene und beschreibt diesen als Federmodell unter der Annahme, dass

- alle Fasern gleiche Durchmesser aufweisen und parallel verlaufen,
- eine regelmäßige Packung der Fasern vorliegt,
- eine vollständige Anbindung der Fasern an die Matrix gegeben ist und
- nur kleine linear elastische Verformungen des FKV-Werkstoffs auftreten.

Der für die Nutzung als Auflager entwickelte FKV-Werkstoff eignet sich auf Grund der unidirektionalen Verstärkungsfasern für die Anwendung der Mischungsregel. Alle gestellten Anforderungen werden durch den FKV-Werkstoff erfüllt. Insbesondere der Aufbau und die reproduzierbare Fertigung des FKV-Werkstoffs ermöglichen eine gleichbleibende Werkstoffqualität, so dass die Ergebnisse der Berechnungen mithilfe der Mischungsregel auch praktisch umgesetzt werden können [34].

Der Aufbau eines Modells für die Mischungsregel sieht ein vereinfachtes, mikromechanisches Modell vor, so dass nicht alle drei Bestandteile aus Matrix, Blähglasgranulat und Glasfaserstäben explizit in die Rechnung einbezogen werden. Der Modellaufbau ist in Abbildung 89 dargestellt.

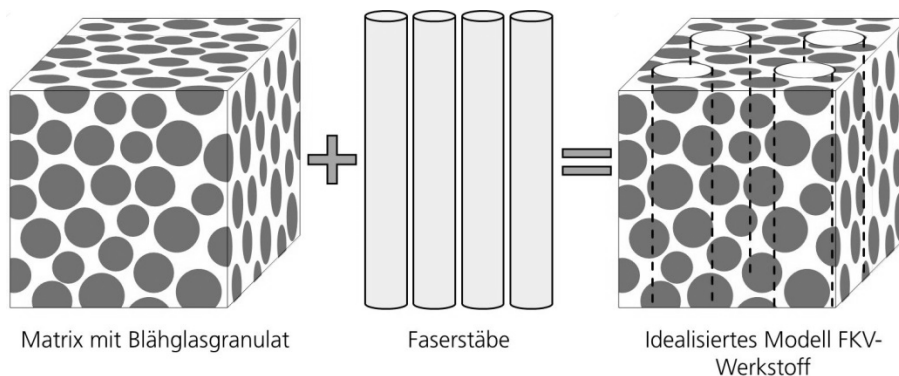


Abbildung 89: Mikromechanisches Modell des FKV-Werkstoffs

Die vorgenommene Vereinfachung sieht die folgenden Annahmen vor:

- Die mechanischen Eigenschaften (Steifigkeit, Druckfestigkeit), die in experimentellen Untersuchungen ermittelt worden sind, werden für das Berechnungsmodell genutzt.
- Die zu berechnenden Werkstoffe werden auf Glasfaserstäbe und das mit Blähglasgranulat gefüllte EP-Matrixsystem reduziert.
- Glasfaserstäbe werden als Verstärkungsfasern definiert.
- Die Festig- und Steifigkeiten der Glasfaserstäbe werden als Verbund aus Matrix und Glasfasern angenommen.
- Das EP-Matrixsystem, bestehend aus Epoxidharz und Blähglasgranulat, wird ferner als ein Werkstoff definiert.
- Auf Grund der Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen wird das mit Blähglasgranulat gefüllte EP-Matrixsystem mit reduzierten Steifig- und Festigkeiten gegenüber dem ungefüllten EP-Matrixsystem angenommen.

Entsprechend den getroffenen Vereinfachungen werden den einzelnen Modellkomponenten Steifig- und Festigkeiten zugewiesen. Anschließend wird eine vereinfachte Federschaltung des Modells erstellt. Hierbei sind die Matrix und die Faserstäbe parallel geschaltet, so dass sich die Federsteifigkeiten addieren. Das Federmodell ist in Abbildung 90 und Formel 22 dargestellt.

Formel 22: Federmodell des FKV-Werkstoffs

$$E_{\parallel} = E_M + E_{F\parallel}$$

E_{\parallel} : Elastizitätsmodul FKV-Werkstoff
 $E_{F\parallel}$: Elastizitätsmodul Faser unidirektional [MPa]
 E_M : Elastizitätsmodul Matrix [MPa]

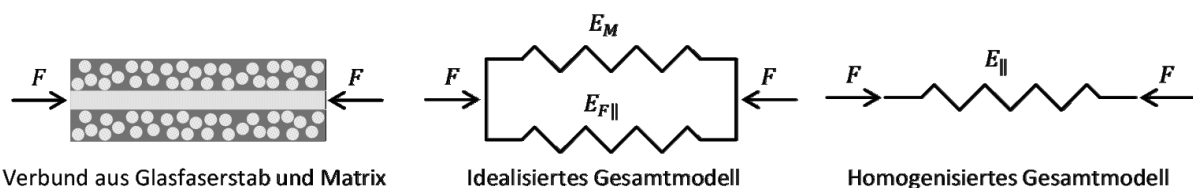


Abbildung 90: Federmodell des FKV-Werkstoffs

Ausgehend vom vereinfachten Modell wird die Mischungsregel für die Berechnung der Steifigkeiten angewendet (vgl. Formel 23).

Formel 23: Mischungsregel aus [34]

$$E_{||} = E_{F||} * \varphi + E_M * (1 - \varphi)$$

$E_{ }$:	Elastizitätsmodul FKV-Werkstoff
$E_{F }$:	Elastizitätsmodul Faser unidirektional [MPa]
E_M :	Elastizitätsmodul Matrix [MPa]
φ :	Faservolumengehalt [%]

Der Elastizitätsmodul des FKV-Werkstoffs wird mithilfe der Mischungsregel sowie den experimentell bestimmten Kennwerten der Einzelkomponenten ermittelt:

- $E_{F||}$: Elastizitätsmodul Faser unidirektional = **31039 MPa**
- E_M : Elastizitätsmodul Matrix = **1945 MPa**
- φ : Faservolumengehalt = **9,1 %**

Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist das Berechnungsergebnis zusammen mit der Festigkeitsberechnung in Abbildung 91 dargestellt.

Neben der analytischen Berechnung der Steifigkeiten kann auf Grund des Aufbaus des FKV-Werkstoffs für unterschiedliche Füllstoffgehalte eine analytische Berechnung der Festigkeiten vorgenommen werden. Dazu kann eine vereinfachte Mischungsregel, welche aus [101] entnommen ist, für unidirektionalverstärkte Lamine angewendet werden.

Die Formel basiert auf der Überlegung, die Bruchdehnung des FKV-Werkstoffs mit der Bruchdehnung der festigkeitssteigernden Fasern gleichzusetzen, da das Faserbruchkriterium ausschlaggebend für das Versagen des FKV-Werkstoffs ist. Davon ausgehend kann die in Formel 24 dargestellte Berechnung abgeleitet werden.

Formel 24: Mischungsregel aus [101]

$$R_{||} = R_{F||} * (\varphi + (1 - \varphi) * \frac{E_M}{E_F})$$

$R_{ }$:	Druckfestigkeit FKV-Werkstoff [MPa]
$R_{F }$:	Druckfestigkeit Faser [MPa]
E_M :	Elastizitätsmodul Matrix [MPa]
E_F :	Elastizitätsmodul Faser [MPa]
φ :	Faservolumengehalt [Vol. %]

Die analytische Bestimmung der Druckfestigkeit wird mit den in den experimentellen Versuchen ermittelten Kennwerten durchgeführt:

- $R_{F||}$: **580 MPa**
- E_M : **1.945 MPa**
- E_F : **31.039 MPa**
- φ : **9,1 %**

Die Ergebnisse der analytischen Berechnungen sind nachfolgend in Abbildung 91 dar- und den experimentellen Versuchen gegenübergestellt.

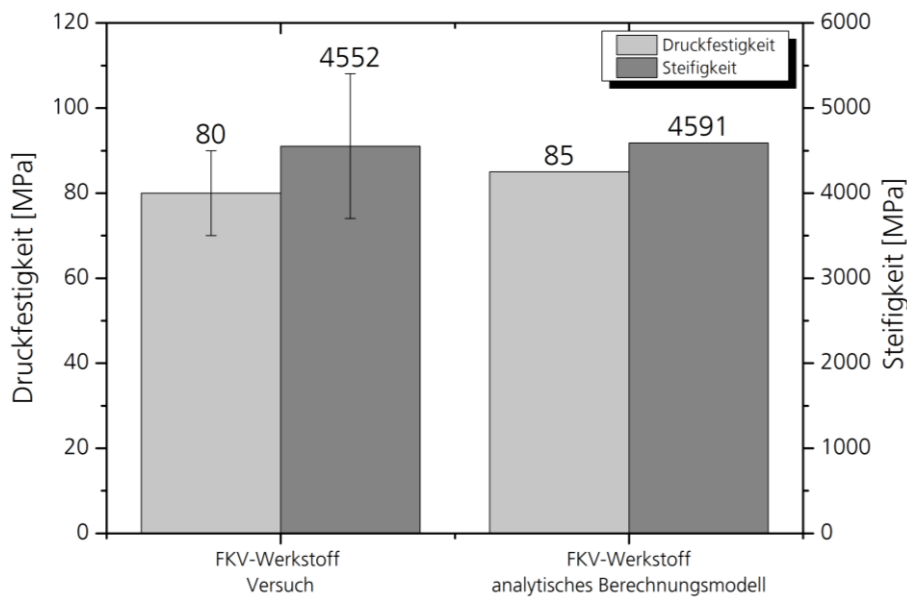


Abbildung 91: Vergleich der Steifig- und Festigkeiten aus den experimentellen Versuchen und analytischen Berechnungen

Die Abbildung 91 zeigt, dass ein Abgleich zwischen experimentellen Ergebnissen und der analytischen Berechnung der Druckfestigkeiten mit einer Abweichung von 6,3 % und bei den Steifigkeiten von knapp 1 % sehr exakte Ergebnisse liefert. Darüber hinaus lassen sich mithilfe dieser Berechnungen für unterschiedliche Faservolumengehalte entsprechende Steifig- und Festigkeiten im linearen Bereich berechnen. Dies kann genutzt werden, um den FKV-Werkstoff zukünftig für variierende Festigkeitsanforderungen entsprechend zu konfektionieren.

7.2 Analytischer Ansatz zur Bestimmung von Wärmeleitfähigkeiten in einem FKV-Werkstoff

Neben den mechanischen Eigenschaften soll durch einen Vergleich mit den experimentellen Untersuchungsergebnissen ebenfalls überprüft werden, ob eine analytische Berechnung der Wärmeleitfähigkeit mit der direkt aus der Literatur entnommenen Formel 25 möglich ist. Ziel ist die Konfektionierung des FKV-Werkstoffs als Isolator entsprechend dem thermischen Anwendungsfall. Bei der Formel handelt es sich um einen Vorschlag von KNAPPE für die Berechnung von Matrixsystemen mit mehr als einem Füllstoff [102, 103]. Ähnlich wie bei den mechanischen Berechnungen wird bei diesen Berechnungsmodellen davon ausgegangen, dass die Wärmeleitfähigkeit maßgeblich durch die eingebrachten Füllstoffe bestimmt wird [103], womit die Wärmeleitfähigkeit direkt vom Füllstoffvolumengehalt abhängig ist. Um die Formel zu nutzen, müssen folgende Annahmen getroffen werden:

- Die Füllstoffe sollen max. 50 % des Gesamtvolumenanteils betragen [103].
- Die Erhöhung eines Füllstoffs führt zu einer gleichmäßigen Reduktion der weiteren Füllstoffe.
- Die Glasfaserstäbe werden mit einer Wärmeleitfähigkeit von E-Glas mit $\lambda = 1,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [63] angenommen.
- Das Blähglasgranulat wird als Glaswerkstoff mit einer Wärmeleitfähigkeit von Glas angenommen $\lambda = 0,8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [41].

- Die im Blähglasgranulat eingeschlossene Luft wird als dritter Füllstoff angenommen mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,026$ [41].

Formel 25: Erweiterte analytische Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten mit n-Füllstoffen

$$\lambda_v = \frac{1 - \sum_{i=1}^n 2 * \varphi * \frac{\lambda_m - \lambda_f}{2 * \lambda_m + \lambda_f}}{1 - \sum_{i=1}^n \varphi * \frac{\lambda_m - \lambda_f}{2 * \lambda_m - \lambda_f}} * \lambda_m$$

λ_m : Wärmeleitfähigkeit Matrix
 λ_f : Wärmeleitfähigkeit Füllstoff
 λ_v : Wärmeleitfähigkeit FKV-Werkstoff
 φ_F : Volumenanteil Füllstoff

Zur Verifizierung der analytischen Berechnungen werden die in den Versuchen (Zweiplattenversuch, Parameter siehe Tabelle 40) experimentell ermittelten Ergebnisse herangezogen. Diese haben gezeigt, dass eine Einbringung von Glasfaserstäben zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit im FKV-Werkstoff führt. Um einen geometrischen Größeneffekt bei der Bestimmung der von den Glasfaserstäben abhängigen Wärmeleitfähigkeit auszuschließen, werden zwei unterschiedliche Glasfaserstabdurchmesser bei einem gleichbleibenden Faservolumengehalt in den FKV-Werkstoff eingebracht. Der Faservolumengehalt soll, wie bei den mechanischen Untersuchungen, 9,2 Vol. [%] betragen. Geringe Abweichungen durch fertigungsbedingte Toleranzen sind zu berücksichtigen.

Tabelle 40: Berechnungsparameter zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten unter Berücksichtigung von variierenden Glasfaserstabdurchmessern

Parameter	Glasfaserstabdicke 10 mm	Glasfaserstabdicke 20 mm
λ_m : Wärmeleitfähigkeit Matrix	0,17 W/m·K (siehe Kapitel 6.4)	0,17 W/m·K (siehe Kapitel 6.4)
λ_f : Wärmeleitfähigkeit Füllstoff Blähglasgranulat	0,8 W/m·K [41]	0,8 W/m·K [41]
λ_f : Wärmeleitfähigkeit Füllstoff Glasfaserstäbe	1,3 W/m·K [63, 104]	1,3 W/m·K [63, 104]
φ_{BL} : Volumenanteil Füllstoff Blähglasgranulat	9,5 %	8,9 %
φ_{GF} : Volumenanteil Füllstoff Glasfaserstäbe	9,2 %	9,5 %
φ_L : Volumenanteil Füllstoff Luft	26,7 %	26,9 %

In Abbildung 92 ist das Ergebnis zwischen experimenteller Untersuchung und dem analytischen Ansatz dargestellt.

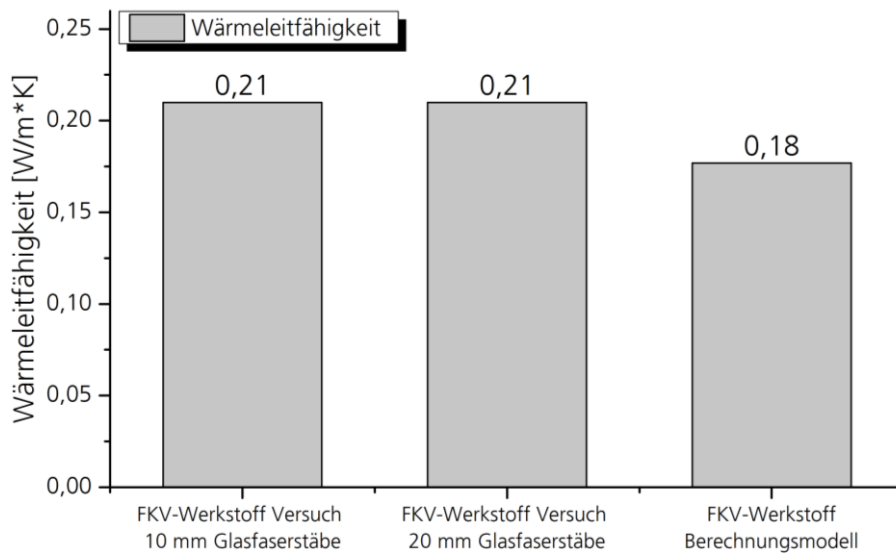


Abbildung 92: Vergleich analytische Berechnung und experimenteller Versuch zur Wärmeleitfähigkeit an FKV-Werkstoffproben

Es zeigt sich, dass es zwischen beiden Ergebnissen zu einer Abweichung von ca. 14 % kommt. Der geometrische Größeneffekt, bedingt durch eine Verdopplung des Glasfaserstabdurchmessers, hat keinen Einfluss auf die experimentell bestimmte Wärmeleitfähigkeit. Dieses Ergebnis bestätigt sich ebenfalls in der Berechnung. Ein Größeneffekt kann daher ausgeschlossen werden. Für die Berechnung ist der Wert in Abbildung 92 somit allgemein für den FKV-Werkstoff mit 0,18 W/m·K angegeben. Die hier ermittelten Ergebnisse bestätigen die in [103] dargestellten Ergebnisse zwischen Versuch und Modell. Bei den in [103] dargestellten vergleichenden Untersuchungen wird ein EP-Matrixsystem mit metallischen Füllstoffen modifiziert. Für variierende Füllstoffgehalte wird bei diesen Untersuchungen im Berechnungsmodell ein dauerhaft niedrigerer experimenteller Wärmeleitfähigkeitswert ermittelt. Alle experimentellen Ergebnisse liegen damit bei diesen Untersuchungen quantitativ über den Berechnungsergebnissen (vgl. S. 90 in [103]). Die Ursachen für erhöhte Messwerte in den experimentellen Versuchen können auf Fertigungsfehler und Randeinflüsse während der Messungen zurückgeführt werden. Ausgehend von den hier ermittelten Ergebnissen kann konstatiert werden, dass die Abweichungen bei unterschiedlichen Füllstoffzusammensetzungen gleichbleibend und systematisch bei ca. 20 % liegen. Dies ermöglicht die Einführung eines empirischen Abgleichfaktors A_w mit einem Wert von 1,2. Wird dieser in die Formel 25 eingefügt, zeigt sich eine Übereinstimmung zwischen Experiment und Berechnung bei variierenden Füllstoffzusammensetzungen von nahezu 100 % (vgl. Abbildung 93, Formel 26).

Formel 26: Erweiterte analytische Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten mit n-Füllstoffen

$$\lambda_c = \frac{1 - \sum_{i=1}^n 2 * \varphi * \frac{\lambda_m - \lambda_f}{2 * \lambda_m + \lambda_f}}{1 - \sum_{i=1}^n \varphi * \frac{\lambda_m - \lambda_f}{2 * \lambda_m - \lambda_f}} * \lambda_m * A_w$$

λ_m : Wärmeleitfähigkeit Matrix
 λ_f : Wärmeleitfähigkeit Füllstoff
 λ_c : Wärmeleitfähigkeit Compositverbund
 φ : Volumenanteil Füllstoff
 A_w : Abminderungsfaktor der Wärmeleitfähigkeit

7.3 Verhalten von FKV-Werkstoffen beim Einsatz festigkeitssteigernder und isolierender Füllstoffe

Durch die Nutzung von festigkeitssteigernden (Glasfaserstäbe) und isolierenden Füllstoffen (Blähglasgranulat) in einem EP-Matrixsystem ergibt sich ein gegenläufiges Verhalten bezüglich der mechanischen Festigkeit des Werkstoffs und der Wärmeleitfähigkeiten [19, 34, 102, 105, 106]. Diese Theorie bestätigt sich in den hier durchgeführten experimentellen Untersuchungen. Eine Erhöhung des Anteils an festigkeitssteigernden Füllstoffen, führt bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit zu einer Zunahme der Festigkeiten in der spröden Harzmatrix. Eine Erhöhung des Anteils an isolierenden Werkstoffen führt bei einer gleichzeitigen Reduktion der Festigkeiten zu einer Reduktion der Wärmeleitfähigkeit. Daraus ergibt sich, dass bei der Nutzung funktionaler Füllstoffe für festigkeitssteigernde und isolierende Wirkmechanismen ein Optimum definiert werden muss. Abbildung 93 und Tabelle 41 stellen das gegenläufige Verhalten dieser beiden funktionalen Füllstoffklassen für Glasfaserstäbe und Blähglasgranulat dar. Die Werte sind teilweise experimentell ermittelt oder mithilfe der vorgestellten Modelle berechnet. Ebenfalls sind für einen direkten Werkstoffvergleich die entsprechenden Werte des Kunstharzpressholzes angegeben.

Tabelle 41: Kennwerte für die Darstellung des gegenläufigen Verhaltens zwischen isolierenden und festigkeitssteigernden Füllstoffen

	Epoxidharz	EP-Matrix mit Blähglasgranulat	Versuch 1 2 mm Stäbe	Versuch 2 10 mm Stäbe	Versuch 3 20 mm Stäbe	Versuch 4 Stäbe mit 20 Vol. [%]
λ_m Epoxidharz:	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
λ_f Pultrudat:	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
λ_f Blähglasgranulat:	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
λ_f Luft:	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026
ϕ_f Pultrudat	0,0 %	0,0 %	0,3 %	9,3 %	8,9 %	20 %
ϕ_f Blähglasgranulat	0,0 %	10,4 %	10,4 %	9,2 %	9,5 %	8,3 %
ϕ_f Luft	0,0 %	29,5 %	29,5 %	26,7 %	26,9 %	23,6 %
Wärmeleitfähigkeit Berechnung* [W/m·K]	-	0,142	0,143	0,176	0,174	0,227
Wärmeleitfähigkeit Berechnung mit A_w ** [W/m·K]	-	0,171	0,172	0,211	0,209	0,272
Wärmeleitfähigkeit Experiment [W/m·K]	0,170	0,170	0,160	0,210	0,210	k.A.
Übereinstimmung Berechnung korrigiert und Experiment	k.A.	1,01	1,07	1,00	1,00	k.A.
Druckfestigkeit [MPa]	118,0	40,7*	38,0	80,0	80,0	145,0***

* Werte nach Formel 25 bestimmt

** Werte nach Formel 26 bestimmt

*** Wert nach Formel 24 bestimmt

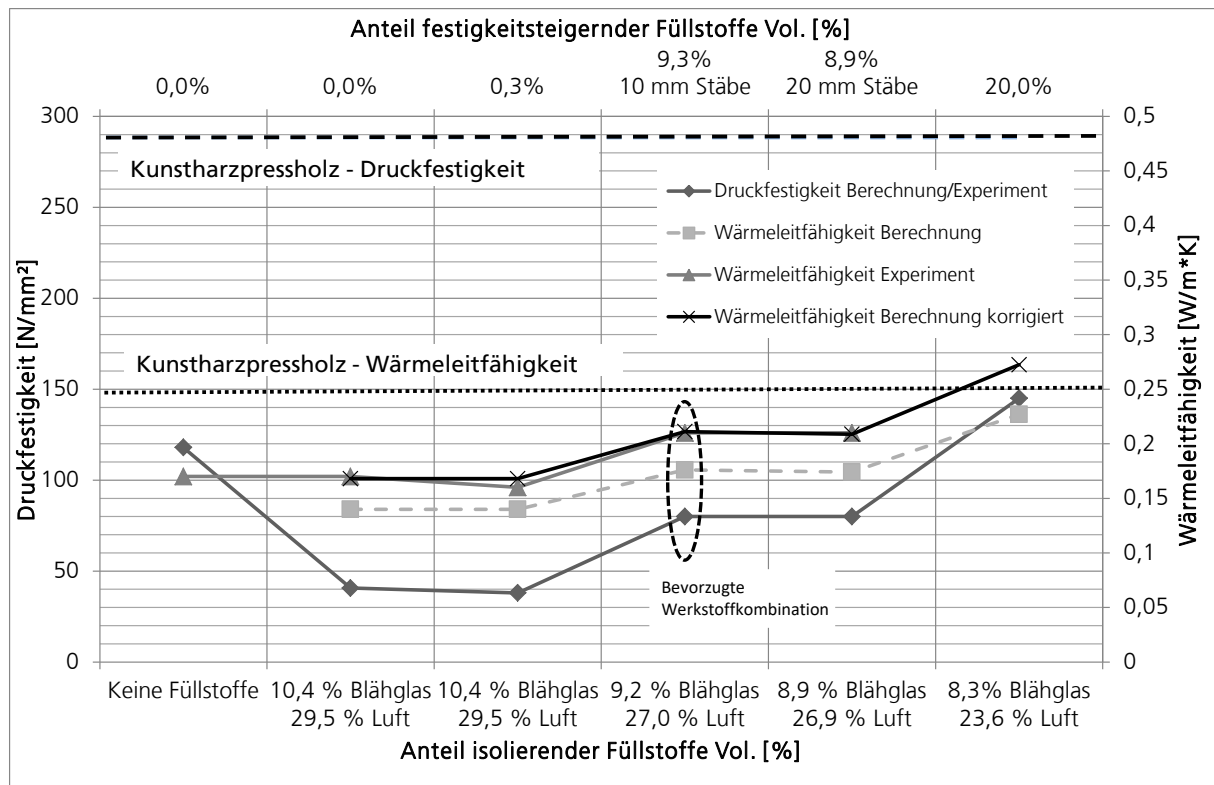


Abbildung 93: Gegenläufiges Verhalten isolierender und festigkeitssteigernder Füllstoffe in einer Epoxidharzmatrix

7.4 Bewertung der Eignung analytischer Berechnungsmodelle zur Prognose

Ausgehend von den experimentellen Untersuchungen und den analytischen Berechnungen kann eine vorläufige ideale Werkstoffzusammensetzung für einen FKV-Werkstoff ermittelt werden. Die experimentellen Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Füllstoffen für die mechanische Verstärkung und die thermische Isolation ergeben, dass der FKV-Werkstoff idealerweise aus einem EP-Matrixsystem mit einem langsamen Härter besteht. Der langsame Härter garantiert eine reproduzierbare Fertigung. Weiter zu nutzende Füllstoffe sind Glasfaserstäbe zur mechanischen Verstärkung und Blähglasgranulat zur thermischen Isolation. Die Einbringung dieser beiden Füllstoffe führt zu einem gegenläufigen Verhalten bezüglich der Festigkeiten und der Wärmeleitfähigkeit. Es kann gezeigt werden, dass das Blähglasgranulat zu einer Reduktion der Festigkeit und der Wärmeleitfähigkeit führt. Das Einbringen der Glasfaserstäbe führt zu einer Steigerung der Festigkeit und der Wärmeleitfähigkeit. Das gegenläufige Verhalten führt dazu, dass ein Kompromiss für die Zusammensetzung des FKV-Werkstoffs unter Beachtung des Anwendungsfalls als Auflagerwerkstoff für einen LNG-Tank gefunden werden muss. Die vorläufige Zusammensetzung des FKV-Werkstoffs für ein Auflager lautet daher wie folgt:

- **EP-Matrixsystem: Ampreg 22 mit dem Härter-„Slow“**
 - lange Topfzeit (> 2,5h)
 - geringe exotherme Reaktion
 - sehr gute mechanische Kennwerte ($\sigma_E = 120 \text{ MPa}$)
 - reproduzierbare Verarbeitung
 - GL Zulassung [55]

- **Füllstoff: Blähglasgranulat (Poraver) 1 mm bis 2 mm**
 - reproduzierbare Verarbeitung
 - geringes Aufschwimmen
 - kostengünstig (0,30 €/l)
 - Reduktion der Wärmeleitfähigkeit des Materials ($\lambda_v = 0,21 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)
 - Dichtereduktion ($0,95 \text{ g/cm}^3$)
- **Verstärkungstoff Glasfaserstäbe mit 2 mm Durchmesser**
 - Steigerung der mechanischen Festigkeiten ($\sigma_v = 80 \text{ MPa}$)
 - kostengünstig (0,5 €/m)
 - geringe Erhöhung der Wärmeleitfähigkeiten
 - reproduzierbare Verarbeitung

Zusammenfassend können die analytischen Berechnungsmodelle für die Bestimmung variierender Füllstoffgehalte und deren Auswirkung auf die mechanischen und thermischen Eigenschaften des FKV-Werkstoffs als geeignet angesehen werden. Mithilfe der Modelle kann ebenfalls eine vorläufige optimierte Werkstoffzusammensetzung ermittelt werden. Für zukünftige Anpassungen bei geänderten Anforderungen können diese ebenfalls genutzt werden. Diese wird im nachfolgenden Kapitel entsprechend der Entwicklungsschritte mit den Anforderungen abgeglichen. Unter der Voraussetzung, dass die Werkstoffkombination allen Anforderungen genügt, soll die hier getroffene Festlegung ebenfalls für die Herstellung eines Versuchsmusters genutzt werden.

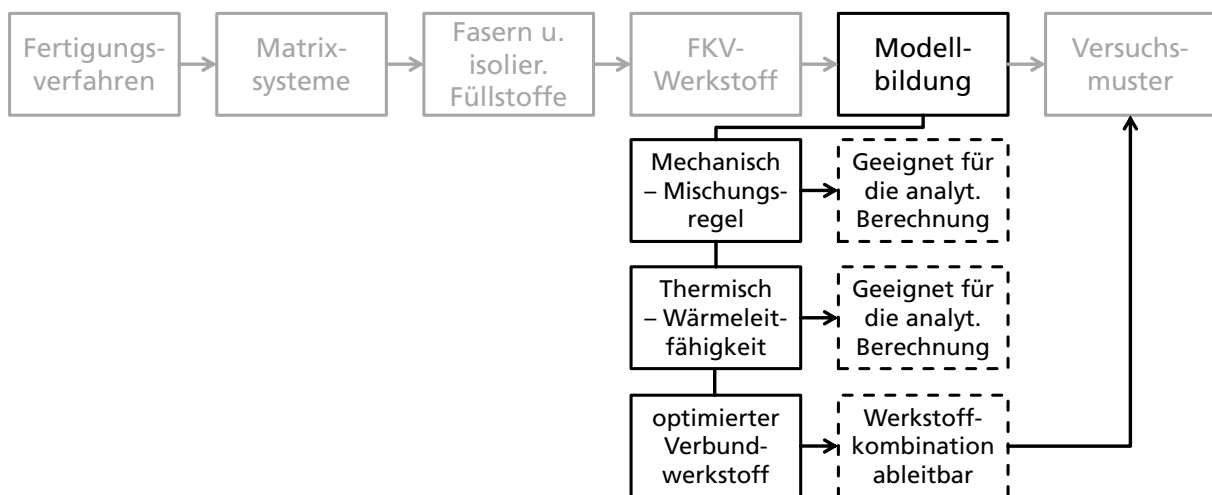


Abbildung 94: Zusammenfassung der Verifizierung der analytischen Berechnungsmodelle

8 Abgleich der Entwicklungsschritte mit den Anforderungen zur Zielerreichung

Abschließend sollen zur Feststellung der Eignung des entwickelten FKV-Werkstoffs die Anforderungen den Ergebnissen der einzeln durchlaufenen Entwicklungsschritte gegenübergestellt werden. Dieser Vergleich soll Aufschluss über die Eignung der optimierten FKV-Werkstoffzusammensetzung für die Anwendung als Auflagerwerkstoff geben.

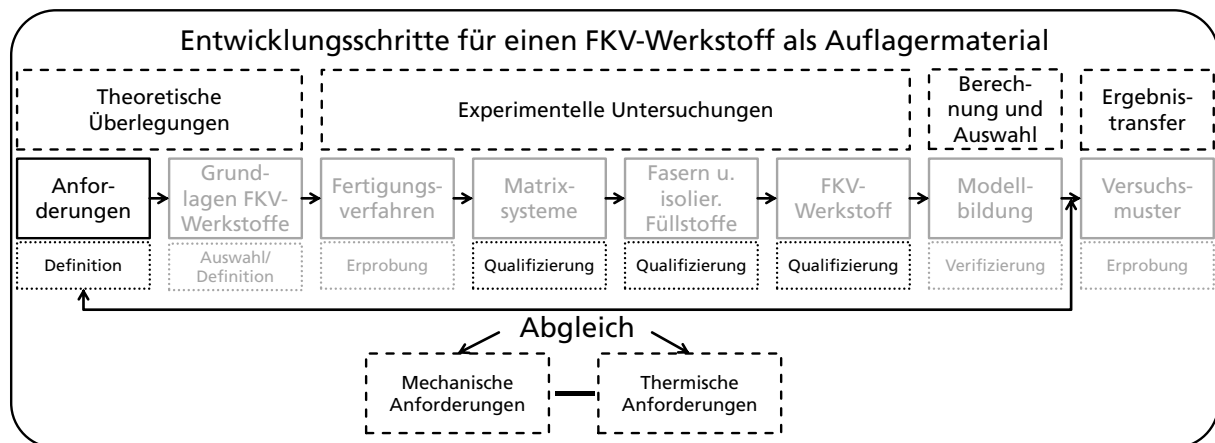


Abbildung 95: Übersicht Abgleich der Anforderungen mit Ergebnissen aus den Entwicklungsschritten

Der Abgleich der Anforderungen soll sich auf die in Kapitel 2.2 definierten Anforderungen beziehen und teilt sich in mechanische und thermische Anforderungen mit den folgenden Unterpunkten auf:

Mechanische Anforderungen:

- Beständigkeit gegenüber statischer Kurz- und Langzeitdruckbelastung
- Beständigkeit gegenüber statischer Scherbelastung
- Beständigkeit gegenüber Ermüdung durch Schwingungen (zur Bildung von zusätzlichen Abminderungsfaktoren)

Thermische und Mediale Anforderungen:

- Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit $< 0,25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [27]
- Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit
- Beständigkeit gegenüber einem dauerhaften Kälteeinfluss (Versprödung durch Tieftemperatur $-163 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Beständigkeit gegenüber eingeschlossenem, gefrorenem Wasser im Werkstoff unter mechanischer Belastung
- Beständigkeit gegenüber starken Temperaturunterschieden (Tank $-163 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und Umgebungstemperatur $\Delta T \geq 150 \text{ K}$)
- Beständigkeit gegenüber schnellen und großen Temperaturschwankungen (Auf- und Abkühlvorgänge)

8.1 Vergleich der mechanischen Anforderungen

Nach Durchführung aller experimentellen Untersuchungen kann die Wirksamkeit der Werkstoffmodifikationen durch einen Soll-Ist-Vergleich untersucht werden. Dazu werden in Tabelle 42 die statischen Anforderungen den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt.

Tabelle 42: Vergleich der mechanischen Zielkriterien mit den experimentellen Ergebnissen für ein Auflager aus einem FKV-Werkstoff

Mechanische Werkstoffbeanspruchung von Werkstoffen für Auflagersysteme mit einer Sicherheit von 4					Experimentelle Ergebnisse des FKV-Werkstoffs ohne Abminderungsfaktoren
			Prismatischer Tank Typ-B	Zylindrischer Tank Typ-C	
Statische Kurz und Langzeit-druckfestigkeit	σ_D	MPa	22,8	1,7	80±10
Scherfestigkeit	τ_{SI}	MPa	68,8	2,86	16,8±0,8

Der Soll-Ist Vergleich für die mechanischen Anforderungen hat zum Ergebnis, dass der FKV-Werkstoff uneingeschränkt für den Zylindrischen Tank Typ-C und nur eingeschränkt für den prismatischen Tank Typ-B genutzt werden kann.

Für den prismatischen **Tank Typ-B** kann mit der gewählten FKV-Werkstoffkombination die geforderte Druckfestigkeit mit einer Sicherheit gegen Materialversagen von ca. 4 erreicht werden. Die Scherfestigkeit hingegen ist mit 16,8 MPa zu gering für die aus der Berechnung gestellten Anforderungen. Der Werkstoff kann daher nicht ohne weitere Anpassungen für dieses berechnete Tankmodell eingesetzt werden. Um den Werkstoff dennoch für dieses Tankmodell einsetzen zu können, müssten weitere materialseitige Änderungen durch mehr Faserverstärkungen eingebracht werden. Zusätzlich wären weitere konstruktive Anpassungen der Auflager notwendig. Eine Möglichkeit ist die Vergrößerung der scherspannungsbelasteten Flächen durch eine geometrische Änderung der Auflagerkonstruktion. Das Ergebnis für dieses Tankmodell bedeutet jedoch nicht, dass der FKV-Werkstoff grundsätzlich für den Tank Typ-B ausgeschlossen ist. Eine Verkleinerung des Tanks z.B. würde zu geringeren Festigkeitsanforderungen führen, so dass der FKV-Werkstoff in diesem Fall eingesetzt werden könnte.

Für den zylindrischen **Tank Typ-C** zeigen die Ergebnisse, dass die wesentlichen mechanischen Kennwerte der Druckfestigkeit und der Scherfestigkeit, unter Beachtung einer rechnerischen Materialsicherheit von 4 sowie der experimentell ermittelten doppelten Standardabweichung, eingehalten werden können. Daraus resultiert die Überlegung, ein Versuchsmusterauflager aus dem definierten FKV-Werkstoff für die Nutzung als Auflager für einen Tank Typ-C zu entwerfen und zu bauen.

Weitere Anforderungen an die Auflager und damit auch an den FKV-Werkstoff ergeben sich aus den vorliegenden medialen/thermischen sowie schwingungsbedingten Belastungen. Diese Belastungen führen zu einer Reduktion der in den experimentell ermittelten statischen/dynamischen Kennwerten und müssen durch die Einführung von Abminderungsfaktoren mit in die Berechnung einbezogen werden. Die Abminderungsfaktoren teilen sich auf in Faktoren für die statische und die dynamische Belastung und wurden vorherig im Rahmen der Arbeit experimentell bestimmt und berechnet (vgl. Kapitel 6.4.4 und Kapitel 6.4.5).

- Statische Abminderungsfaktoren für mediale Einflüsse auf den FKV-Werkstoff:
 - Tieftemperatur A_{TT} : 1,5
 - Klimazyklus A_{KL} : 0,9
 - Tanksimulation A_{TS} : 1,0
- Abminderungsfaktoren aus den Schwingfestigkeitsuntersuchungen bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 % und 95 %:
 - Referenzstäbe: $A_{R50\%}$: 0,8 $A_{R95\%}$: 0,7
 - Reduzierte Stabanzahl: $A_{RS50\%}$: 0,6 $A_{RS95\%}$: 0,5
 - Klimazyklus: $A_{K50\%}$: 0,6 $A_{K95\%}$: 0,4
 - Tanksimulation: $A_{T50\%}$: 0,7 $A_{T95\%}$: 0,7

Die ermittelten Abminderungsfaktoren können nun bspw. für statische und schwingfestigkeitsbeanspruchte Lastfälle in die Formel 5 für die Berechnung der Druckfestigkeit eingesetzt werden. Zusätzlich zu den Abminderungsfaktoren wird die aus [22] geforderte Sicherheit von 4 gegen ein Materialversagen der beanspruchten Bauteile in die Formel zur Berechnung des Soll-Ist-Vergleichs aufgenommen. Dadurch ergibt sich die in Formel 27 dargestellte Vergleichsrechnung. Bei einer Kombination mehrerer Abminderungsfaktoren kommt es zu einer Überlagerung von Einflüssen durch die Schwingfestigkeitsuntersuchungen. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen werden nur gesonderte Abminderungsfaktoren für jeweils eine mediale/thermische Belastung und einer anschließenden schwingungsbeanspruchten Belastung ermittelt. Werden die hier dargestellten Abminderungsfaktoren, auf Grund mehrerer zu berücksichtigender medialer/thermischer Belastungen kombiniert, wird der Einfluss der schwingungsbeanspruchten Belastung doppelt oder mehrfach einbezogen. Dies kann dazu führen, dass die Berechnung konservativer/niedriger als die tatsächliche in der Praxis auftretende Belastung ausfällt.

Formel 27: Vergleich der Anforderungen mit der Druckfestigkeit des FKV-Werkstoffs unter Einbeziehung von Abminderungsfaktoren

$$\frac{-f_{yy}}{A_{\text{Auflager}}} * [4 \text{ (Sicherheitsfaktor) }] \leq \sigma_D * [A_1 * A_2 * \dots * A_n] * \left[\frac{1}{4} \text{ (Sicherheitsfaktor)} \right]$$

σ_D : Druckfestigkeit des FKV-Werkstoffs
 $-f_{yy}$: Druckkraft in vertikaler Richtung auf Auflager
 A_{Auflager} : Fläche der Auflagerblöcke
 A_n : Abminderungsfaktoren

Nachfolgend sind entsprechend Formel 27 die Ergebnisse für die Anwendung einzelner Abminderungsfaktoren bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 % und der zusätzlichen Beachtung des Sicherheitsfaktors von 4 gegen Materialversagen in Abbildung 96 dargestellt. Für die Berechnung werden unterschiedliche statische und dynamische Szenarien mit den entsprechenden Abminderungsfaktoren am Beispiel des **Tanks Typ-C** gegenübergestellt (vgl. 4.1.2). Als Belastungsfall wird eine vertikal wirkende Druckkraft mit 1.328 kN angenommen. Die Auflagerfläche wird mit 3,14 m² gewählt. Im Ergebnis muss der Werkstoff unter Berücksichtigung der Materialsicherheit von 4 einer Druckbelastung von $\sigma_D \geq 1,7$ MPa standhalten. Die maximale Festigkeit für den FKV-Werkstoff wird zur Sicherheit mit der doppelten Standardabweichung gewählt und beträgt damit 60 MPa. Ausgehend von dieser Festigkeit werden die Abminderungsfaktoren zur Berechnung der geminderten Festigkeiten für unterschiedliche mediale/thermische Belastungsfälle einbezogen. Die gewählten Szenarien sind:

- FKV-Werkstoff in gewählter optimierter Werkstoffzusammensetzung ohne mediale und thermische Belastung
- FKV-Werkstoff in gewählter optimierter Werkstoffzusammensetzung nach Klimazyklus
- FKV-Werkstoff in gewählter optimierter Werkstoffzusammensetzung nach Tanksimulation
- FKV-Werkstoff in gewählter optimierter Werkstoffzusammensetzung nach Tanksimulation und Klimazyklus
- FKV-Werkstoff in gewählter optimierter Werkstoffzusammensetzung nach Tanksimulation, Klimazyklus und statischer Belastung bei Tieftemperatur (-163 °C)

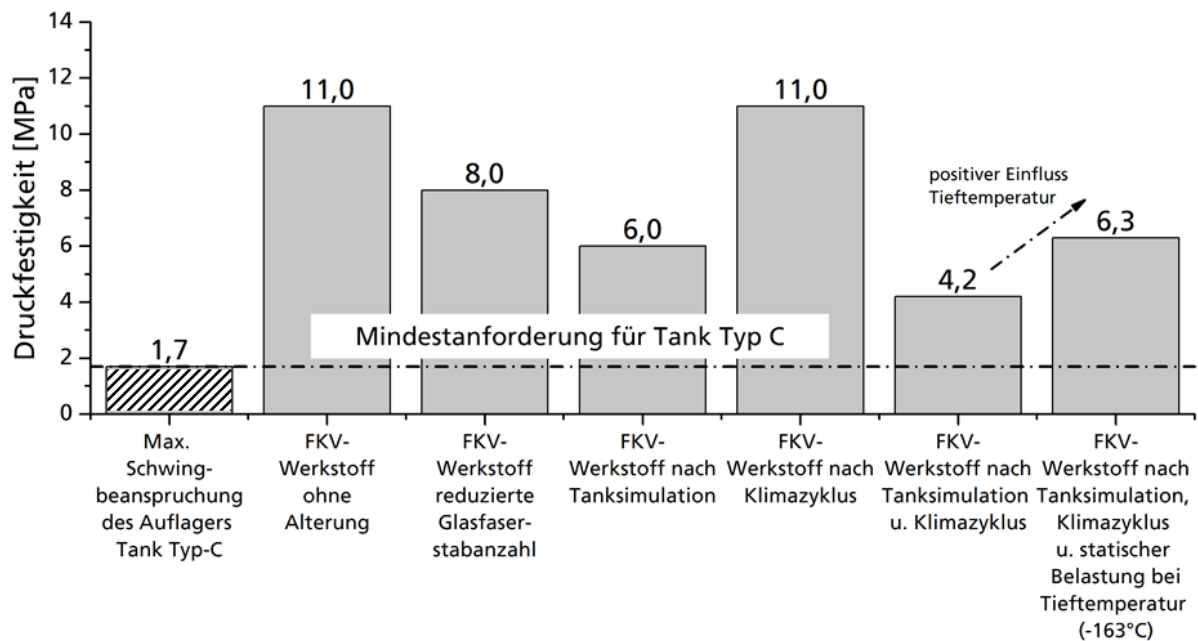


Abbildung 96: Druckfestigkeiten bei unterschiedlichen Belastungsszenarien und Vergleich der Ergebnisse mit den Anforderungen

Das Ergebnis der Analyse zeigt, dass der FKV-Werkstoff für einen Einsatz als Auflagerwerkstoff in einem Tank Typ-C geeignet ist. Alle entstehenden Belastungen können durch den Werkstoff ertragen werden.

Die Anforderung eines niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten kann ebenfalls erfüllt werden. Der ermittelte Wärmeausdehnungskoeffizient liegt mit $17 \cdot 10^{-6}$ knapp über dem Wärmeausdehnungskoeffizienten von Stahl mit $10\text{--}15 \cdot 10^{-6}$ K. Eine signifikante Entstehung von Eigenspannungen im Tank oder den Lagern während der Auf- und Abkühlprozesse ist nicht zu erwarten.

8.2 Vergleich der thermischen und medialen Anforderungen

Die thermischen Anforderungen an einen FKV-Werkstoff zur Nutzung als Auflagermaterial definieren sich über die thermischen Eigenschaften des derzeit genutzten Kunstharzpressholzes, welches eine Wärmeleitfähigkeit von $0,24 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (vgl. Kapitel 6.4.6) aufweist. Das Ziel bei der Entwicklung des FKV-Werkstoffs ist die Reduzierung dieses Parameters. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen (vgl. Abbildung 97) zeigen, dass dies durch einen Einsatz von Blähglasgranulat als isolierender Füllstoff möglich ist. Mit dem Einsatz von Blähglasgranulat und Glasfaserstäben in einer optimierten FKV-Werkstoffkombination kann eine Wärmeleitfähigkeit

von 0,21 W/m·K erreicht werden. Angewendet auf das in Kapitel 4.2 vorgestellte Beispiel der Berechnung des Wärmeeintrags in einen Tank Typ-C kann der Gesamtwärmeeintrag, der über die Auflager in den Tank eingebracht wird, damit um ca. 16 % reduziert werden.

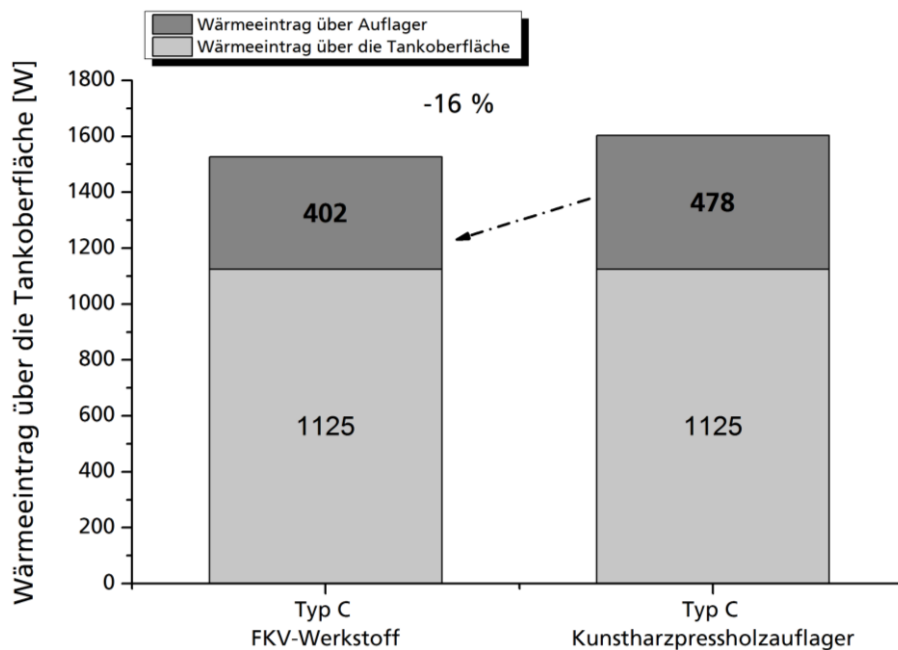


Abbildung 97: Auswirkungen der Substitution der Kunstharzpressholzaufleger durch FKV-Werkstofflager

Die Untersuchungen der Beständigkeit des FKV-Werkstoffs gegenüber thermischen und medialen Anforderungen zeigen, dass der Werkstoff grundsätzlich für einen Einsatz unter Tieftemperatur geeignet ist. Thermische Belastungen bei dauerhaften Temperaturunterschieden und schnellen Auf- und Abkühlvorgängen führen zu akzeptablen festigkeitsmindernden mechanischen Eigenschaften. Gegen ein Eindringen von Feuchtigkeit wird die Nutzung eines Gel-Coats präferiert. Inwieweit der Werkstoff auftretende Vereisungen verhindern und wie stark der Boil-Off reduziert werden kann, muss durch praktische Feldversuche ermittelt werden.

8.3 Zusammenfassung des Abgleichs der Entwicklungsschritte

Der Abgleich der mechanischen und thermischen/medialen Anforderungen ist erfolgreich. Es kann eine ideale Werkstoffzusammensetzung für einen aus mechanischer Sicht unbeschränkten Einsatz des FKV-Werkstoffs bei einem beispielhaften Tankmodell des Typ-C definiert werden.

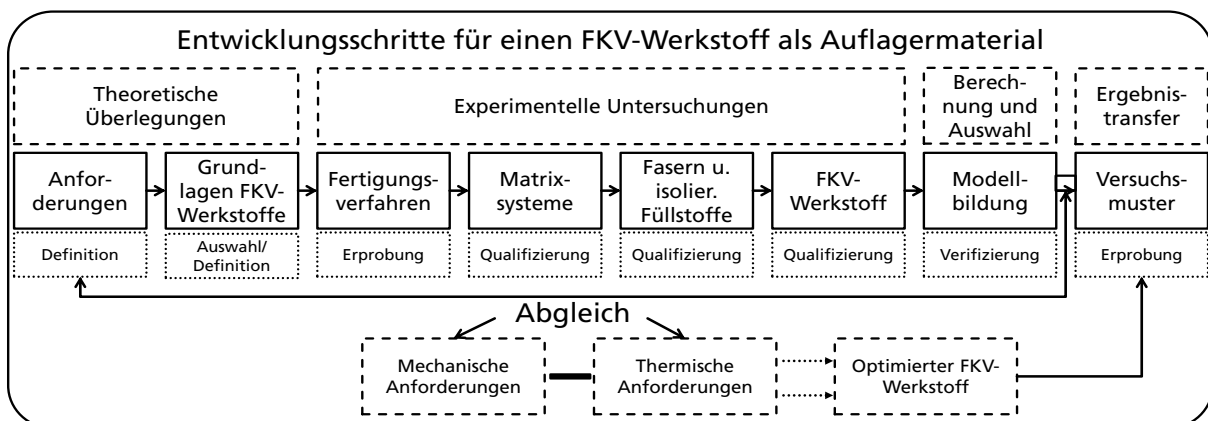


Abbildung 98: Zusammenfassung des Abgleichs der Anforderungen aus den Entwicklungsschritten

9 Fertigung eines Versuchsmusters

Ausgehend von der optimierten Werkstoffzusammensetzung des FKV-Werkstoffs ist das Ziel die Fertigung eines Auflagerversuchsmusters. Die Arbeit wird unter Laborbedingungen durchgeführt. Als Werkstoffzusammensetzung wird die ermittelte optimierte FKV-Werkstoffkombination angestrebt. Die Erprobung der Fertigung eines Versuchsmusters wird durch die folgenden in Abbildung 99 und nachfolgend beschriebenen zusammengefassten Arbeiten dargestellt:

- Auswahl und Beschreibung des Auflagermodells,
- Entwicklung, Konstruktion und Bau einer Form,
- Auslegung einer Kühlung der Form während des Infusionsprozesses und der Aushärtung,
- Werkstoffzusammensetzung und Besonderheiten bei der Großskalierung,
- Auslegung des Herstellungsprozesses (Vakuuminfusion, VARTM) sowie
- Entformen und Nachbearbeitung des Versuchsmusters.

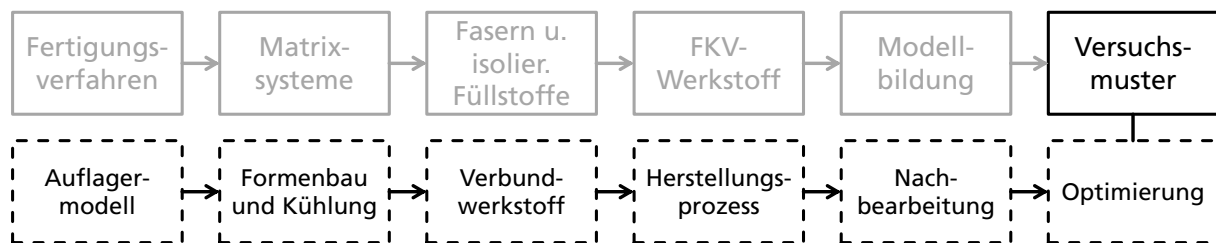


Abbildung 99: Übersicht Erprobung der Fertigung eines Versuchsmusters

9.1 Auswahl und Beschreibung des Auflagermodells

Als geeignete Vorlage für ein Auflagerversuchsmuster aus dem FKV-Werkstoff wird ein Kunstharzpressholzaufleger aus einem Bauteilversuch für ein Festlager eines Tanks Typ-C genutzt. Die Vorlage hierfür wurde bei der KAEFER Isoliertechnik GmbH in Bremen aus Kunstharzpressholz erfolgreich unter einem Tankversuchsmuster verbaut. Das Modell hat die in Abbildung 100 dargestellten geometrischen Abmaße. Das herzustellende Versuchsmuster aus dem FKV-Werkstoff wird in einem Größenverhältnis von 1:1 zum Originalmodell (vgl. Abbildung 100) übernommen.

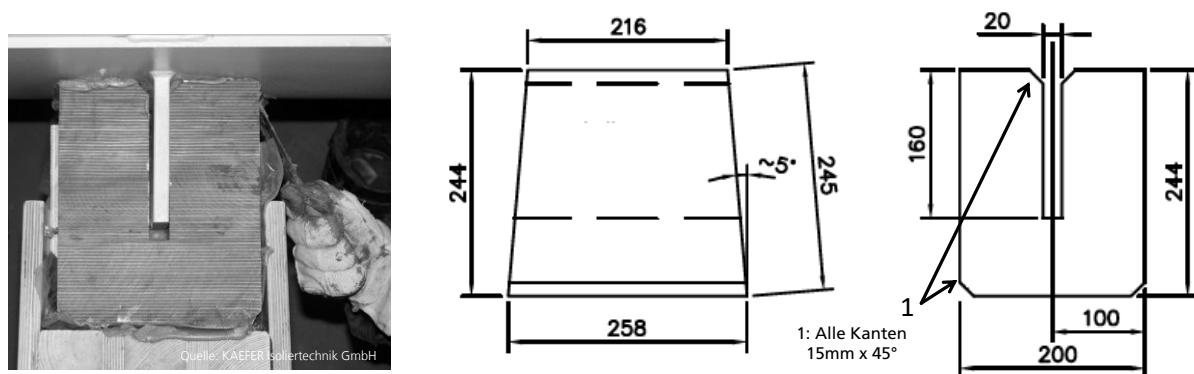


Abbildung 100: Darstellung des verbauten Modells (in Einbausituation) sowie der abgeleiteten geometrischen Abmaße (alle in mm) des Versuchsmusters [107]

9.2 Entwicklung, Konstruktion und Bau einer Form

Die Form zur Herstellung eines Auflagers wird als teilbare Form, die über Schrauben zusammensetzbar ist und aus mehreren Teilkomponenten besteht, ausgeführt [107]. Die Innenkanten der Form werden mit einem Radius ausgeführt, um eine vollständige Befüllung der Form zu gewährleisten und Spannungsspitzen an den Formkanten zu vermeiden. Im Bereich des Einlasses für das Tankschwert wird auf einen Radius verzichtet, um einen späteren Formschluss zwischen Tank und der Auflagerschwertaufnahme zu ermöglichen. Zusätzlich wird die Schwertaufnahme mit einer Ausformschräge von 1° versehen, um eine Entformung möglich zu machen. Die Form ist nachfolgend in Abbildung 101 dargestellt.

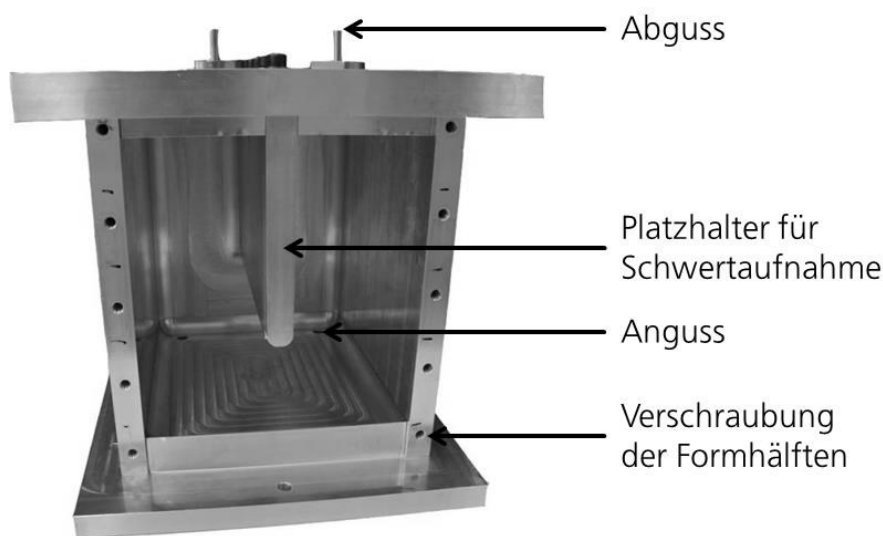


Abbildung 101: Mehrteilige Form (Teilzusammenbau)

9.3 Auslegung einer Kühlung der Form während des Infusionsprozesses und der Aushärtung

Zur Vermeidung einer verfrühten und zu stark eintretenden exothermen Reaktion des reaktiven EP-Matrixsystems muss die Form während des Infusionsprozesses gekühlt werden. Dies wird durch eine Wasserkühlung gewährleistet. Dazu wird die gesamte Form in einem Wasserbehälter platziert. Zusätzlich werden Kühlspiralen um die Form drapiert, die mit temperiertem Wasser durchströmt werden. In einem Vorversuch wird ein 3 kg Harzansatz bei einer Temperatur von 5°C angesetzt. Die dabei entstehenden exothermen Reaktionstemperaturen werden durch Temperaturfühler ermittelt. Das Ergebnis dieses Vorversuchs ist, dass es zu keiner Aushärtung des Harzes kommt, da eine Temperatur von 5°C unterhalb des Glasübergangspunkts des flüssigen Harzsystems liegt (vgl. Abbildung 102 TTT-Diagramm). In diesem Temperaturbereich findet keine Aushärtung des reaktiven Harz-Härtergemisches statt. Daher wird für die Erprobung der Fertigung des Versuchsmusters eine Temperierung des Kühlbades auf 10°C festgelegt. Die Einhaltung dieser Temperatur kann durch eine Kühlung gewährleistet werden. Die Harzmenge, die für den Versuch benötigt wird, beträgt ca. 8,5 kg. Aus den Ergebnissen der DSC-Untersuchungen wird ermittelt, dass bei einer vollständigen Vernetzung des EP-Matrixsystems mit einem langsamen Härter („Slow“) ca. 382 J/g freigesetzt werden. Der vollständige Aushärteprozess des EP-Matrixsystems wird durch Rheometermessungen bei 23°C ermittelt und beträgt ca. 300 Minuten. Bei einer Harzmenge von 8,5 kg entsteht damit über den gesamten Aushärteprozess des EP-Matrixsystems eine Gesamtwärmeleistung von 2.703 W. Da

die Versuche nur bei sehr kleinen Harzmengen durchgeführt werden, muss eine Sicherheit gegen eine stärker einsetzende Reaktionsgeschwindigkeit eingerechnet werden. Diese wird mit 3 definiert, da aus praktischen Erfahrungen eine Vernetzung sehr viel schneller eintreten kann. Daher muss die gesamte Leistung von 2.703 W über 100 Minuten lang abgebaut werden. Die genutzte Wärmepumpe erzeugt laut Datenblatt eine Kühlenergie von 2.600 Wh. Die Form mit dem reaktiven EP-Matrixsystem erzeugt eine Energie von 1.622 Wh. Eine Kühlung der Form auf 10 °C kann daher durch die Kühlpumpe und ein zusätzliches Wasserbad gewährleistet werden. Der Kühlaufbau sowie die einzelnen Stufen eines Aushärtungsprozesses (vgl. TTT-Diagramm) bei einem EP-Matrixsystem werden nachfolgend in Abbildung 102 dargestellt.

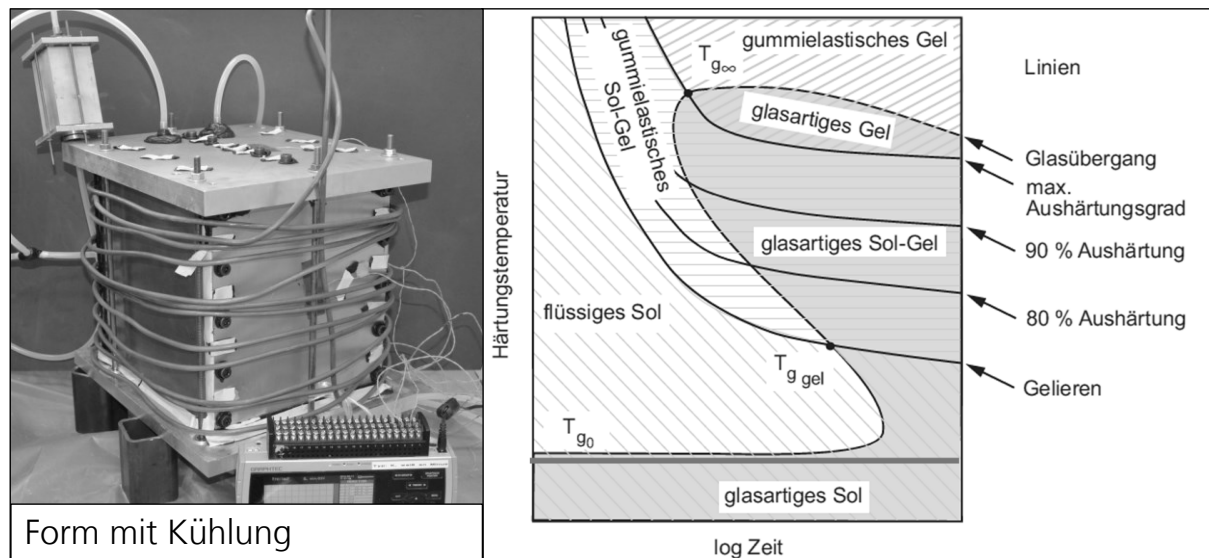


Abbildung 102: Kühlaufbau (li.) [107] und TTT-Diagramm (re.) [19]

9.4 Werkstoffzusammensetzung und Besonderheiten bei der Großskalierung

Für die Herstellung eines Versuchsmusters ergeben sich Besonderheiten, die nur in einem Bauteilversuch ermittelt werden können. Insbesondere die Glasfaserstäbe lassen sich nicht wie in den experimentellen Versuchen verarbeiten, da die einzubringenden Glasfaserstäbe auf Grund ihres Eigengewichts eine starke Krümmung entwickeln. Daraus resultiert die Überlegung, die Glasfaserstäbe nicht einzeln einzubringen, sondern als Gitterstruktur (3-dimensional), um die Krümmung der Glasfaserstäbe zu vermeiden. Durch den Transport und die Lagerung der Glasfaserstäbe auf Rollen kann ebenfalls eine Krümmung dieser festgestellt werden. Daher müssen die Glasfaserstäbe nach dem Transport ausreichend lange ungerollt gelagert (> 3 Monate) werden, um entsprechende Entspannungsvorgänge und eine geringe Krümmung zu gewährleisten.

Die Gitterstruktur wird als dreidimensionale Struktur konstruiert und vor dem eigentlichen Infusionsprozess hergestellt. Dazu werden die Glasfaserstäbe entsprechend der Geometrie des späteren Auflagers abgelängt und über eine Form mit schnellhärtendem Epoxidharz miteinander verklebt. Aus diesen zweidimensionalen Strukturen wird anschließend durch Glasfaserverbindungsstäbe in die dritte Dimension eine entsprechende Struktur erstellt, welche dann als Kompletstruktur in die Form eingesetzt werden kann. Eine Erprobung der Struktureinbringung ohne verbindende Stäbe zwischen den einzelnen Gittern und die Stützung

der Gitter durch die Form wird ebenfalls untersucht, um zu prüfen, ob damit eine Reduktion der Fertigungszeiten erzielt werden kann. Auch dieses Verfahren kann als geeignet angesehen werden. Die entsprechenden Arbeitsgänge sind nachfolgend, chronologisch von links nach rechts in Abbildung 103 dargestellt.

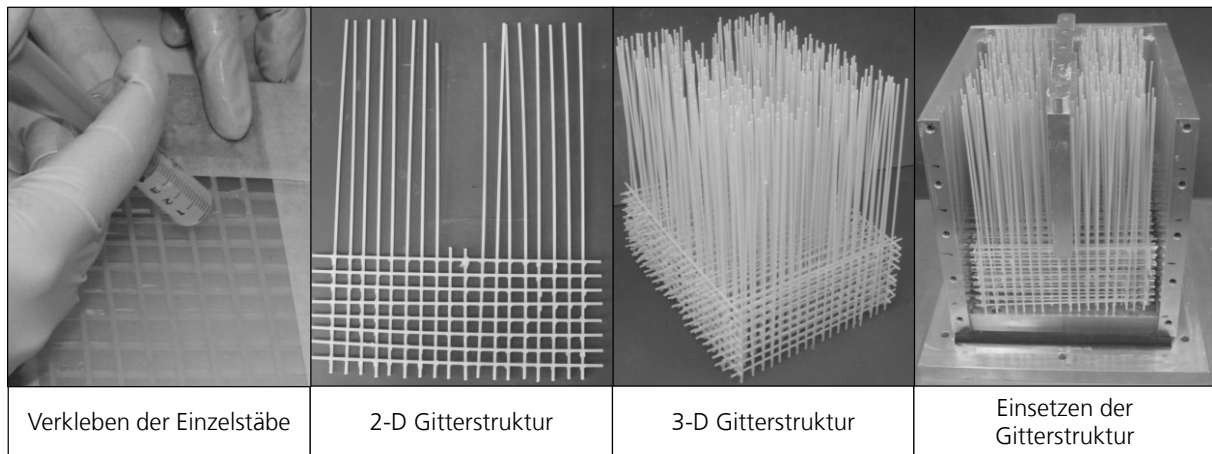


Abbildung 103: Erstellung einer 3-dimensionalen Faserverstärkungsstruktur

Auf Grund der Fertigung der Gitterstruktur unter Laborbedingungen in einem manuellen Prozess kann der bei den mechanischen Versuchen erreichte Faservolumengehalt von ca. 9,5 % nicht erzielt werden. Eine dichtere Positionierung der Glasfaserstäbe lässt sich in einem manuellen, händischen Prozess nicht erreichen. Das Versuchsmuster besteht folglich aus:

- FVG 4,5 %
- Blähglasgranulat 9,2 %
- Poren 26,7 % und
- Harz 59,6 %.

Diese Materialzusammensetzung ist ebenfalls geeignet, um den Fertigungsprozess eines Auflagerversuchsmusters zu erproben und Erkenntnisse über die Eignung des Vakuuminfusionsverfahrens oder des VARTM-Verfahrens zu generieren.

9.5 Konzeption des Herstellungsprozesses (Vakuuminfusion, VARTM)

Die Fertigung des Versuchsmusters soll mithilfe des Vakuuminfusionsverfahrens und des VARTM-Verfahrens durchgeführt werden. Die Arbeitsschritte zur Herstellung des Versuchsmusters sind identisch mit dem in Abbildung 36 dargestellten Verfahren zur Herstellung von Versuchsproben. Einzig die Verdichtung des Blähglasgranulats erfordert mehr Aufwand, da das zu füllende Volumen bei dem Versuchsmuster sehr viel größer als bei den Probekörpern ist. Dies wird im Labor in einem manuellen Prozess durch die Impulsanregung der Form mit einem Hammer erreicht. Zur Reduktion des Harzverbrauchs wird für das Versuchsmuster ein Blähglasgranulat mit einem geringeren Durchmesser gewählt, da so eine stärkere Verdichtung mit Füllstoffen möglich ist. Die Parameter und die Versuchsergebnisse der beiden Versuche sind nachfolgend tabellarisch in Tabelle 43 dargestellt.

Tabelle 43: Vergleich verschiedener Herstellungsprozesse eines Auflager-Versuchsmusters

Parameter	Vakuuminfusions-Verfahren	VARTM-Verfahren
Vorbereitungszeit	ca. 6h	ca. 6h
Anlagentechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Form • Kühlung mit Wärmetauscher und Pumpe • Vakuumpumpe • Harzfalle 	<ul style="list-style-type: none"> • Druckstabile Form • Kühlung mit Wärmetauscher und Pumpe • Druckpumpe • Vakuumpumpe • Harzfalle
Matrixmaterial	Ampreg 22 mit Härter Extra „Slow“	Ampreg 22 mit Härter „Slow“
Isolationsfüllstoff	Blähglasgranulat 0,25 bis 0,5 mm	Blähglasgranulat 0,25 bis 0,5 mm
Verstärkungsfasern	<ul style="list-style-type: none"> • 16 Gitterstrukturen verbunden zu einer 3-dimensionalen Struktur • Ø Stäbe 2 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • 16 Gitterstrukturen unverbunden und gehalten über Form • Ø Stäbe 2 mm
Kühlung	Wasserkühlung bei 10 °C	Wasserkühlung bei 10 °C
Positionierung der Form	Waagerecht	Diagonal angeschrägt zur Optimierung des Weges zwischen An- und Abguss und einer Verbesserung der Luftevakuierung/Luftaustritts
Probleme/Fehlstellen	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbildung von Harzkanälen und Verdrängung des Blähglasgranulats • Verstopfen des Angusses durch ausreagierendes Harz während des Infusionsprozesses • Teilweise trockene Stellen an Oberfläche der Werkzeugform 	<ul style="list-style-type: none"> • Austritt von Harz an Dichtungen der Form • zu frühes Entformen und damit Entstehung von Fehlstellen an Oberflächen formseitig
Infusionszeit	3,5h	1,5h
Entformungszeit	42h	18h

Als Ergebnis des Vergleichs der beiden Versuchsvarianten lässt sich hinsichtlich der Infusionszeiten und der Oberflächenqualität die Nutzung des VARTM-Verfahrens als das geeignetere Verfahren ermitteln. Beim VARTM-Verfahren kann die Infusionszeit um 57 % reduziert werden, was zu einer direkten Fertigungskosteneinsparung sowie zu einer erhöhten Fertigungsreproduzierbarkeit führt. Ein vorzeitiges Vernetzen des Epoxidharzes in den Angüssen wird verhindert. Weiterhin sind die erzielten Oberflächenqualitäten sowie die Benetzung der Füllstoffe mit Matrixmaterial qualitativ hochwertiger. Einzig eine zu frühe Entformung führt zu fehlerhaften Oberflächen, so dass die Entformungszeit ebenfalls länger gewählt werden muss. Anzustreben sind Zeiten > 24h. Eine Gittereinbringung ohne verbindende Stäbe zwischen den einzelnen Gittern und eine Stützung dieser über die Form ist für eine Fertigung der Auflager ebenfalls zielführend. Die entstehenden Fehlstellen sowie die Gesamtergebnisse der Versuche sind nachfolgend in Abbildung 104 dargestellt.

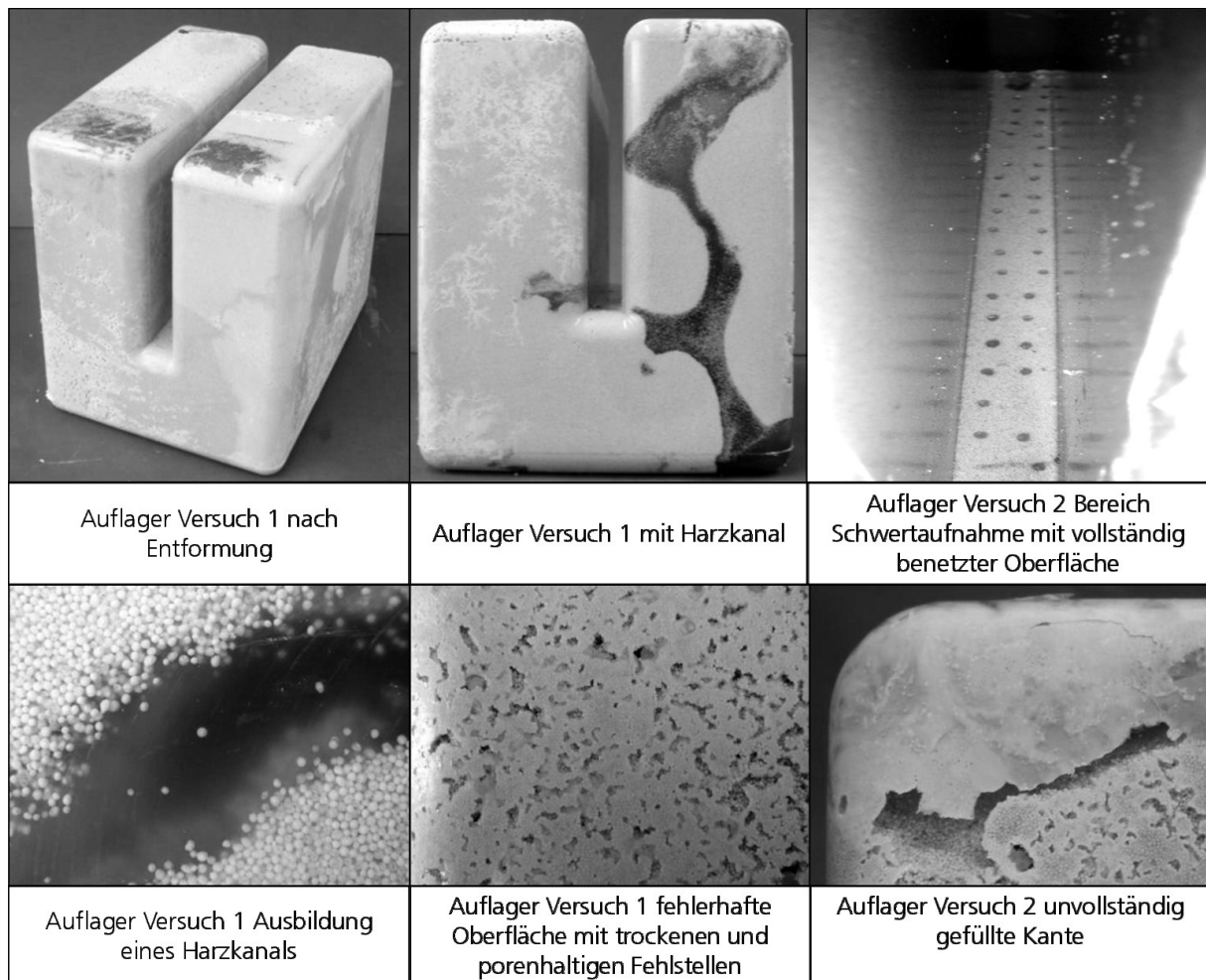


Abbildung 104: Ergebnisse der Versuchsmusterherstellung

9.6 Nachbearbeitung des Versuchsmusters

Eine aufwendige Nachbearbeitung des entformten Auflagers kann durch Formoberflächen mit geringer Rauheit vermieden werden, da diese zu einer ausreichenden Oberflächengüte führen. Zu Versuchszwecken wird das Auflager aus dem Versuch 1 nachträglich bearbeitet. Die Arbeitsschritte Schleifen, Spachteln und Lackieren werden mit einem Bearbeitungsaufwand von ca. 2 h in manueller Arbeit ausgeführt (vgl. Abbildung 105).

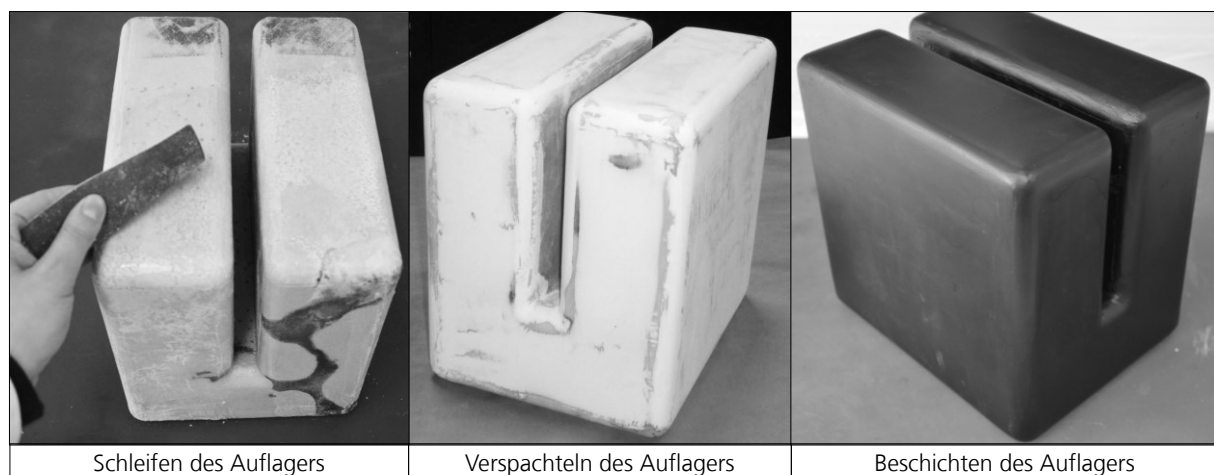


Abbildung 105: Nachbearbeitungsaufwand für das Versuchsmuster

9.7 Zusammenfassung der Versuchsmusterherstellung

Die Ergebnisse der Versuchsmusterherstellung eines Auflagers aus einem FKV-Werkstoff sind zufriedenstellend. Für eine weitere industrielle Umsetzung des FKV-Werkstoffauflagers sollten zur Fertigungskostensenkung und Erhöhung einer reproduzierbaren Qualität einige Verbesserungen angestrebt werden. Die Verbesserungen sollten hinsichtlich einer automatisierten Herstellung der Gitterstruktur, einer optimierten Konstruktion der Form oder Formhalterung für einen besseren An-/ Abguss und damit Harzein- und Luftaustritt sowie durch die Nutzung eines Gel-Coats zur Verbesserung der Oberflächenqualität bei gleichzeitigem Schutz gegen Wassereintritt angestrebt werden. Die Ergebnisse des Versuchsmustertests sind in Abbildung 106 und vergleichend in Abbildung 107 dargestellt.

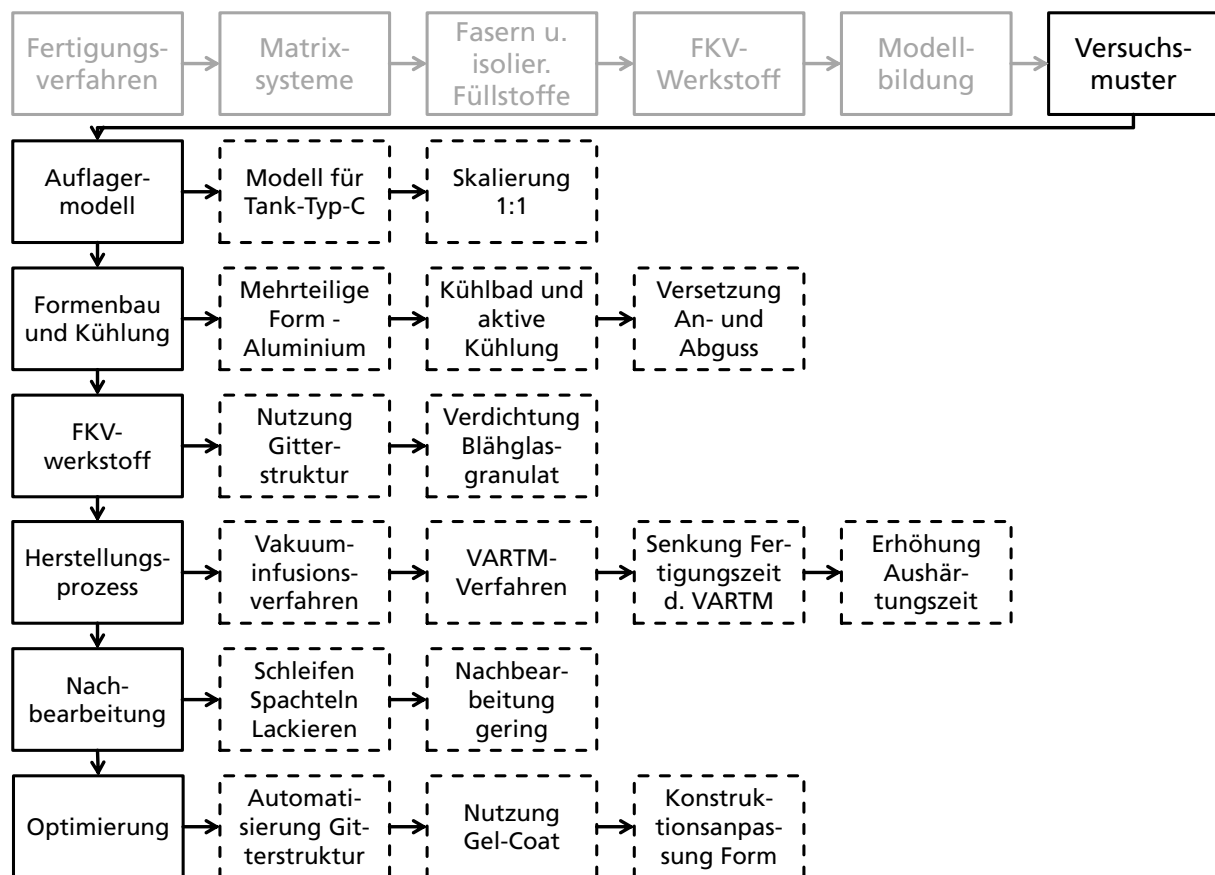


Abbildung 106: Zusammenfassung der Versuchsmusterherstellung

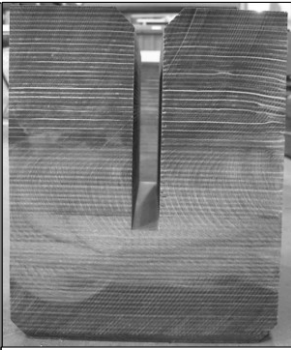

<ul style="list-style-type: none"> • Länge: 258 mm • Breite: 200 mm • Höhe: 244 mm • Gewicht: ca. 17 kg • Hoher Nachbearbeitungsaufwand durch mechanische CNC Bearbeitung • Keine Modifikationsmöglichkeiten • Befriedigende thermische Isolationseigenschaften ($\lambda = 0,25 \text{ W/m}^*\text{K}$) 	 <p>Kunsthartzpressholzaufleger</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Länge: 258 mm • Breite: 200 mm • Höhe: 244 mm • Gewicht: ca. 12 kg • Endkonturnahe Fertigung durch geringe Nachbearbeitung • Modifikationsmöglichkeiten durch Füllstoffzusammensetzung • verbesserte thermische Isolationseigenschaften ($\lambda = 0,21 \text{ W/m}^*\text{K}$) 	 <p>FKV-Werkstoff-Auflager</p>
--	--	---	---

Abbildung 107: Vergleich zwischen dem Kunsthartzpressholzaufleger und dem FKV-Werkstoff-Auflager

10 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Entwicklung eines FKV-Werkstoffs zur Lagerung von LNG-Tanks in Schiffen. Der FKV-Werkstoff soll die bisherig auftretenden Defizite bei der Nutzung von Kunstharzpressholz als Auflagerwerkstoff verbessern. Die auftretenden Defizite sollten durch die Entwicklung eines FKV-Werkstoffs mit einer erhöhten thermischen Isolationsleistung und einer verbesserten Beständigkeit gegenüber medialen/thermischen Belastungen beseitigt werden. Dazu wurden die in Abbildung 108 dargestellten Entwicklungsschritte durchlaufen sowie deren Ergebnisse teilveröffentlicht [7, 35, 36, 108 bis 112]. Ferner werden die Ergebnisse der hier vorliegenden Untersuchungen auf Grund ihrer Komplexität und dem Interesse kommerzieller Anwender in einer Offenlegungsschrift/Patent dokumentiert [109].

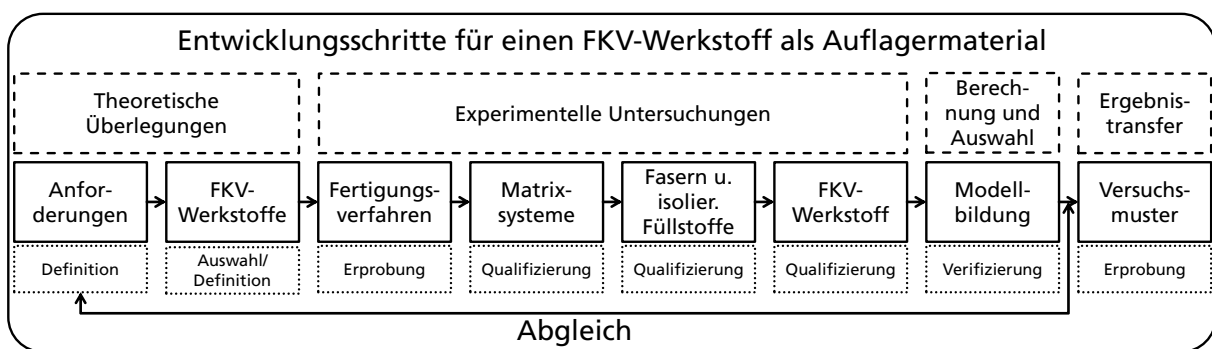


Abbildung 108: Entwicklungsschritte für einen FKV-Werkstoff als Auflagermaterial

Die Ergebnisse der einzelnen Entwicklungsschritte werden nachfolgend zusammenfasst und als Thesen formuliert.

I. Definition von Anforderungen

Die wesentlichen mechanischen und thermischen Belastungen für Auflagerwerkstoffe werden durch die Anforderungen aus der Einbausituation der Lager bestimmt. Ferner geben Richtlinien (IGC/ASME) und Berechnungsvorschriften Ansätze zur Bestimmung der durch die Tankmasse und die Schiffsbewegungen verursachten Belastungen auf die Auflager vor. Zusätzlich werden aus der Praxis empirische Faktoren, die teilweise oberhalb der Auslegungsrichtlinien liegen, genutzt. Im Rahmen dieser Arbeit werden die mechanischen Belastungen für die Auflagerwerkstoffe nach den höchsten Belastungen berechnet und zusammengetragen. Die Lager müssen die durch den Tank verursachten mechanischen Kräfte abtragen. Diese sind als Druck- und Scherkräfte sowie durch eine Ermüdungsbelastung gekennzeichnet. Im Rahmen der Arbeit werden an zwei Tankbeispielen die tatsächlich in den Werkstoffen auftretenden Spannungen berechnet, die damit für den zu entwickelnden FKV-Werkstoff als zu erfüllende Kennwerte definiert sind. Diese zu erfüllenden Kennwerte werden in experimentellen Untersuchungen ermittelt und sind in der nachfolgenden Tabelle für die Druck- und Scherfestigkeit zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 44: Mechanische Mindestanforderungen an Auflagerwerkstoffe

			Prismatischer Tank Typ-B	Zylindrischer Tank Typ-C
Druckfestigkeit	σ_D	MPa	16,8	1,7
Scherfestigkeit	τ_{SL}	MPa	68,8	2,86

Neben den mechanischen Anforderungen müssen die Lager als thermische Isolatoren ($\lambda \leq 0,25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [27]) dienen, resistent gegenüber medialen Belastungen (Feuchtigkeit, starke und rasche Temperaturwechsel) sein sowie dauerhafte tiefkalte Temperaturen von $-163 \text{ }^\circ\text{C}$ ertragen.

II. Auswahl und Definition aller relevanten Komponenten für die Entwicklung eines FKV-Werkstoffs

Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass für den entwickelten FKV-Auflagerwerkstoff eine Reihe von Einzelkomponenten benötigt wird. Als Matrixsystem wird, wie bei Strukturbauteilen üblich [34], Epoxidharz gewählt. Die anforderungsbedingte Modifikation des Epoxidharzes erfolgt mit thermisch isolierenden und festigkeitssteigernden Fasern. Die Auswahl der festigkeitssteigernden Fasern beschränkt sich auf Kurzfasern und Glasfaserstäbe. Für eine thermische Isolierung werden Blähglasgranulat und Mikrohohlgaskugeln ausgewählt. Diese ermöglichen es definiert Luft in eine EP-Matrix einzubringen, so dass die Isolationsleistung des FKV erhöht wird. Zur Überprüfung der Wirksamkeit der Füllstoffe ist es zwingend notwendig experimentelle Untersuchungen durchzuführen. Neben der Auswahl der Einzelkomponenten ist die Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens zur reproduzierbaren Herstellung von FKV-Werkstoffen entscheidend. Dafür kommen die Verfahren Gießen, Vakuuminfusion und VARTM in Frage.

III. Erprobung von Fertigungsverfahren

Die Nutzung von Füllstoffen und Fasern hat einen signifikanten Einfluss auf das Fertigungsverfahren und seine Reproduzierbarkeit. Die endgültige Auswahl der Komponenten kann daher nur unter deren Berücksichtigung erfolgen. Kurzfasern und Mikrohohlgaskugeln führen bspw. beim Verfahren des Gießens zu einem Aufschwimmen und zu Agglomerationen. Damit ist die Nutzung von verschiedenen Füllstoffen bestimmend für die Auswahl eines Fertigungsverfahrens und schließt damit einige dieser aus. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass mithilfe der Fertigungsverfahren Vakuuminfusion und VARTM sowie den Füllstoffen Blähglasgranulat und Glasfaserstäben eine qualitativ reproduzierbare Fertigung eines FKV-Werkstoffs möglich ist.

IV. Qualifizierung eines Matrixsystems

Für die Fertigung eines Auflagers aus einem FKV-Werkstoff ist ein EP-Matrixsystem mit einer langen Topfzeit für eine reproduzierbare und wärmearme Fertigung zu wählen. Das im Rahmen dieser Arbeit genutzte System Ampreg 22 steht stellvertretend für ein solches System und kann als geeignet angesehen werden. Eine Temperung des kaltaushärtenden Harzsystems nach dem Entformen führt zu einem steiferen und mechanisch stärker belastbaren Werkstoff, welcher über einen weiten Temperaturbereich von $-165 \text{ }^\circ\text{C}$ bis ca. $50 \text{ }^\circ\text{C}$ eingesetzt werden kann. Der Arbeitsschritt der Temperung wird daher aus fertigungstechnischer Sicht empfohlen.

V. Qualifizierung von festigkeitssteigernden Fasern und isolierenden Füllstoffen

Die experimentelle Untersuchung von festigkeitssteigernden Fasern und thermisch isolierenden Füllstoffen zeigt, dass die gewählten Glasfaserstäbe sehr gute mechanische Eigenschaften als festigkeitssteigernde Füllstoffe mitbringen. Die Festigkeit des EP-Matrixsystems kann durch die Einbringung der Glasfaserstäbe proportional erhöht werden. Der konstante FVG der Stäbe garantiert eine gleichbleibende Qualität, so dass auch die mechanischen Eigenschaften garantiert werden können. Eine etwaige Krümmung der Stäbe kann durch eine Lagerung dieser in liegender Form reversibel gemacht werden. Die Einbringung von Blähglasgranulat führt mit einem zunehmenden Füllstoffdurchmesser zu einer Reduktion der mechanischen Festigkeiten in einem EP-Matrixsystem und gleichzeitig zu einer Dichtereduktion. Mit diesen Untersuchungen kann gezeigt werden, dass die festigkeitssteigernden Glasfaserstäbe und das Blähglasgranulat geeignete Füllstoffe sind. Die qualitative Werkstoffzusammensetzung des FKV-Werkstoffs lautet damit wie folgt:

Epoxidharzsystem: **Ampreg 22 + Härter „Slow“**

Füllstoff festigkeitssteigernd: **Glasfaserstäbe Ø 2 mm**

Füllstoff thermisch isolierend: **Blähglasgranulat 1-2 mm**

VI. Qualifizierung eines FKV- Werkstoffs

Für die experimentellen Untersuchungen wird die folgend in Tabelle 45 dargestellte qualitative und quantitative Werkstoffkombination gewählt. Durch die Tatsache, dass mit dem Blähglasgranulat definiert Luft in Porenform eingebracht wird, wird die Luft quantitativ als dritter Füllstoff aufgeführt und das Blähglasgranulat als Festkörper ohne Poren bestimmt. Dieser Aspekt wird ebenfalls bei der Modellbildung berücksichtigt.

Tabelle 45: Zusammensetzung des untersuchten FKV-Werkstoffs

Werkstoff	Komponente	Volumenanteil [%]
EP-Matrixsystem	Ampreg 22 mit "Slow"-Härter	54,6
Füllstoff festigkeitssteigernd	Glasfaserstäbe Ø 2 mm	9,2
Füllstoff thermisch isolierend	Blähglasgranulat Poraver Ø 0,5 -2 mm	9,5
Poren	-	26,7

Diese optimierte Werkstoffzusammensetzung wird hinsichtlich mechanischer, thermischer und physikalischer Kennwerte untersucht. Eine Auswahl der wichtigsten Ergebnisse hinsichtlich der Grundanforderungen ist nachfolgend in Tabelle 46 dargestellt. Alle weiteren Kennwerte sind in dem Kapitel 6.4 vollständig dargelegt.

Tabelle 46: Ausgewählte Kennwerte für FKV-Werkstoff

Anforderung	Formelzeichen	Kennwert
Druckfestigkeit Raumtemperatur	$\sigma_D 20\text{ °C}$	$80\pm 10\text{ MPa}$
Druckfestigkeit Tieftemperatur	$\sigma_D -163\text{ °C}$	$119\pm 19\text{ MPa}$
Scherfestigkeit	τ	$16,8\pm 0,8$
Wärmeleitfähigkeit	λ	$0,21\text{ W/m}\cdot\text{K}$
Beständigkeit gegenüber tiefen Temperaturen, Temperaturunterschieden und Temperaturwechseln	-	Ja

VII. Verifizierung analytischer Modelle mit experimentellen Untersuchungen

Die Variation der Füllstoffe führt zu einer Veränderung des FKV-Werkstoffverhaltens, wodurch der FKV-Werkstoff für unterschiedliche Anwendungen angepasst werden kann. Eine Durchführung von experimentellen Versuchen benötigt Zeit und verursacht Kosten. Zur Vermeidung dieser können einfache analytische Berechnungsmodelle zur Bestimmung von mechanischen und thermischen Eigenschaften eines FKV-Werkstoffs genutzt werden. Die Eignung der genutzten Modelle kann nachgewiesen werden.

Das Modell 1 nach SCHÜRMANN [34] für die Steifigkeitsberechnung (FKV-Mischungsregel) und das Modell 2 nach KRIMMER [101] für die Festigkeitsberechnung sind Rechenmodelle zur Verifizierung der mechanischen Belastbarkeit. Mit diesen Modellen kann eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen Untersuchungen und der Berechnung ermittelt werden. Es ist damit möglich, eine Modifikation der festigkeitssteigernden Glasfaserfüllstoffe vorzunehmen und die Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des FKV mithilfe der beiden Modelle ohne Anpassungen zu berechnen.

Das Modell 2 nach KNAPPE [103] beschreibt die Veränderung der Wärmeleitfähigkeiten bei unterschiedlichen Füllstoffkombinationen. Die Ergebnisse zeigen Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung von ca. 20 % mit der Tendenz, dass eine Berechnung geringere Werte erzeugt, als in den experimentellen Untersuchungen ermittelt wird. Dies bestätigen die in [103] dargestellten Ergebnisse bei der Nutzung des Modells. Die Genauigkeit des Modells kann durch die Nutzung des vorgeschlagenen und fertigungsbedingten Abminderungsfaktors A_w von 1,2 verbessert werden.

Weiterhin kann mithilfe der experimentellen Untersuchungen und der Nutzung der Rechenmodelle das gegenläufige Werkstoffverhalten eines mit festigkeitssteigernden Fasern und thermisch isolierenden Füllstoffen modifizierten Epoxidharzes ermittelt werden. Die Einbringung von Blähglasgranulat als thermisch isolierender Füllstoff senkt die Wärmeleitfähigkeit und verringert die Festigkeiten des Werkstoffs. Das Einbringen der Glasfaserstäbe erhöht die Festigkeit und die Wärmeleitfähigkeit. Damit können, die in der Literatur [19, 34, 102, 105, 106] getroffenen Annahmen bestätigt und im Rahmen dieser Arbeit zusammengeführt werden. Als Konsequenz ergibt sich daraus immer die Notwendigkeit der Ermittlung eines Optimums aus Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit entsprechend der jeweiligen Anforderungssituation. Dieses Optimum kann ebenfalls durch die Nutzung der Rechenmodelle gefunden werden.

VIII. Abgleich der Ergebnisse mit den definierten Anforderungen

Der Abgleich der Anforderungen mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen und Berechnungen zeigt, dass der FKV-Werkstoff sich als Auflagerwerkstoff für kleinere Drucktanks, die zumeist als zylindrische Fuel-Tanks Typ-C auf Schiffen ausgeführt sind, eignet. Bei kleineren Tanks wirken sich die Isolationseigenschaften positiver aus als bei größeren Tanks, da das Verhältnis der Auflagerfläche zur Tankoberfläche geringer ist und der Wärmestrom der Auflager damit einen größeren Einfluss auf den Gesamtwärmestrom in den Tank hat. Die bei kleineren Tanks auftretenden Kräfte können unter Beachtung aller Sicherheits- und Abminderungsfaktoren ertragen werden. Die Nutzung des FKV für sehr große drucklose Tanksysteme ist nicht uneingeschränkt möglich. Insbesondere auftretende Querkkräfte verursachen zu starke Scherbeanspruchungen im FKV-Material. Hier sind ergänzend zu einer alternativen Werkstoffauswahl konstruktive Maßnahmen notwendig.

IX. Erprobung der Erkenntnisse durch die Fertigung eines Versuchsmusters

Die Fertigung von FKV-Auflagern lässt sich nicht nur in Probenform, sondern auch in einem großskalierten Versuchsmuster unter Laborbedingungen durchführen. Das FKV-Auflager kann mit der gleichen Geometrie wie ein Kunstharzpressholzauflager gefertigt werden. Auf Grund der Größe eines zu verbauenden Auflagers müssen das Fertigungsverfahren und wenige werkstofftechnische Anpassungen vorgenommen werden. Das Verfahren des VARTM ist auf Grund einer Zeitersparnis in der Fertigung mit dem Faktor 2 zur Fertigung großskalierter Auflager dem Verfahren der Vakuuminfusion, vorzuziehen. Neben der technischen Umsetzung der Fertigung eines Auflagers aus einem FKV-Werkstoff kann auch gezeigt werden, dass der Nachbearbeitungsaufwand nach der Entformung auf Grund der endkonturnahen Fertigung gering gehalten werden kann.

Die Eignung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und mit Fasern und Füllstoffen modifizierten FKV-Werkstoffs als Material für ein LNG-Tankauflager konnte grundsätzlich nachgewiesen werden. Der FKV-Werkstoff erfüllt die Anforderungen einer verbesserten Isolationsleistung, einer medialen Beständigkeit und den mechanischen Belastungsanforderungen. Ferner lässt sich der FKV-Werkstoff reproduzierbar fertigen.

11 Literaturverzeichnis

- [1] Verband der Schweizerischen Gasindustrie: Erdgas - die freundliche Energie. CO2, Zürich 2011
 - [2] Eisenring, C.: Die endlichen Ressourcen scheinen nicht erschöpfbar, Washington 2013.
<http://www.nzz.ch/die-endlichen-ressourcen-scheinen-nicht-erschoeffbar-1.18114519#kommentare>
 - [3] Lisowski, E. , Czyżycki, W.: Transport and storage of LNG in container tanks. Journal of KONES (2011) Vol. 18 No. 03, S. 193–201
 - [4] ClassNK Executive Operations Division. Class NK Magazine (2013) 66th Edition
 - [5] Suvisaari, S.: Delivering LNG in smaller volumes, 2012.
<http://www.indetailmagazine.com/en/article/smaller-scale-lng-deliveries/1/2012/>
 - [6] Ffooks, R.: Natural gas by sea. The development of a new technology. London, New York: Gentry Books; Nichols Pub. Co. 1993
 - [7] TP 2H: Experimentelle Optimierungsverfahren für Verbindungen und Oberflächenschutzsysteme von Isolier- und Auflagersystemen sowie Entwicklung eines integralen Qualitätssicherungssystems. POLAR- VP2 - Abschlussbericht 03WKBX02HWanner, M.-C., Ehrich, K. u. Glück, N., Rostock 2009-2012
 - [8] IMO Code; 2014. Internationaler Code für die Ausrüstung von Schiffen zur Beförderung verflüssigter Gase als Massengut.
<http://www.imo.org/Publications/IMDGCode/Pages/Default.aspx>, abgerufen am: 03.11.2014
 - [9] Harris, F. S.: Safety features on LNG ships. Cryogenics No. 33 (1993) 8, S. 772–777
 - [10] Evangelista, J.: Tank support for the LNG revolution - OE Digital, 2014.
<http://www.oedigital.com/component/k2/item/6276-tank-support-for-the-lng-revolution>, abgerufen am: 23.11.2014
 - [11] Concept study for cargo container-based transport of LNGEhrich, K., Rostock 2014
 - [12] Dunky, M. u. Niemz, P.: Holzwerkstoffe und Leime. Technologie und Einflussfaktoren. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2002
 - [13] St. Buchmüller, K. u. Fuchs, G.: Technologische Eigenschaften von Phenolformaldehydharz-imprägniertem Fichtenholz. Holz als Roh und Werkstoff 1988 (1988) Nr. 46, S. 413–416
 - [14] Fa. H. A. Springer - marine + industrie service GmbH: EPOCAST 36-P TANK INSTALLATION HANDBOOK. Technisches Datenblatt. <http://www.springer-kiel.com/>, abgerufen am: 13.12.2014
 - [15] Permal: Tank Supports for LNG, LEG and LPG. Technisches Datenblatt, 2014
 - [16] Röchling Haren KG: Lignostone - Laminated Compressed Wood. Tank supports for LNG and LPG vessels Technisches Datenblatt, 2014, abgerufen am: 13.12.2014
-

-
- [17] Röchling Haren KG: Durolight. High strength thermal insulation products Technisches Datenblatt, abgerufen am: 13.12.2014
 - [18] Zhou S. u. Lowery, R.: Effectiveness of glass-based insulation material in cryogenic applications. LNG Industry (2015) No. 4 - April
 - [19] Ehrenstein, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften. München [u.a.]: Hanser 2006
 - [20] Requirements concerning GAS Tankers International Association of Classification Societies, 1980
 - [21] Vorschrift; 2013. ASME Code - Pressure Vessels, Transport Tanks.
 - [22] Office of the Federal Register National Archives and Records Service General Services Administration (Hrsg.): Code of regulations. Transportation, Bd. 49. Washington: U.S. Government Printing Office 1983
 - [23] Kamke, F. A.: Modified Wood for New Product Opportunities. Joint EWPAA-FWPA Symposium. Queensland 2014
 - [24] Haberecht, T.: Entwicklung eines Modells zur Auslegung von Transport-Containern für kryogene Flüssiggase, Universität Rostock 2014
 - [25] Harperscheidt, J.: Bunkering, infrastructure, storage, and processing of LNG. Ship & offshore (2011) No. 1, S. 12–15
 - [26] TIAX: U.S. and Canadian Natural Gas Vehicle Market Analysis. Liquefied Natural Gas Infrastructure. Final Report, 2013
 - [27] Dehonit: Kunstharzpressholz. Technisches Datenblatt, 2011, abgerufen am: 12.10.2015
 - [28] VDI 2255 Blatt 3; November 1998. Konstruktionsmethodik Technisch-wirtschaftliches Konstruieren Technisch wirtschaftliche Bewertung.
 - [29] Abdou, A. A.: Comparison of Thermal Conductivity Measurements of Building Insulation Materials under Various Operating Temperatures. Journal of Building Physics 29 (2005) No. 2, S. 171–184
 - [30] Endres, E. u. Kleser, J.: Wärmedämmstoffe aus Polyurethan-Hartschaum. PUR, der Hochleistungs-Dämmstoff ; Herstellung - Anwendung - Eigenschaften. Stuttgart: IVPU 2005
 - [31] Radcliffe, D. J. u. Rosenberg, H. M.: The thermal conductivity of glass-fibre and carbon-fibre/epoxy composites from 2 to 80 K. Cryogenics 22 (1982) No. 5, S. 245–249
 - [32] Witkiewicz, W. u. Zieli A.: PROPERTIES OF THE POLYURETHANE (PU) LIGHT FOAMS, Polen 2006. <http://www.pg.gda.pl/mech/kim/AMS/022006/AMS02200605.pdf>, abgerufen am: 31.01.2015
 - [33] Czichos, H. (Hrsg.): Hütte. Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften; mit 337 Tabellen. VDI. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer 2000
 - [34] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007
-

- [35] Ehrich, K.: Untersuchung alternativer Materialien hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit in Auflagern für Flüssiggastanks, Universität Rostock 2011
 - [36] Ehrich, K.: Custom made Composite Supports for LNG Cargo Systems. Polar Workshop. Rostock 2013
 - [37] el Moctar, B.: LNG-Transport in der Binnenschifffahrt. Motivation und Herausforderungen, 2011. http://www.ptj.de/lw_resource/datapool/_items/item_3296/vortrag_elmoctar.pdf, abgerufen am: 10.01.2015
 - [38] Nordic Yards: Loads on Supports. Preliminary. 11.02.11
 - [39] Grote, K.-H., Feldhusen, J. u. Dubbel, H.: Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin, New York: Springer 2005
 - [40] Dobrinski, P., Krakau, G. u. Vogel, A.: Physik für Ingenieure. Studium. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010
 - [41] Hering, E., Martin, R. u. Stohrer, M.: Physik für Ingenieure. Mit 116 Tabellen und 2 Faltafeln. Springer-Lehrbuch. Berlin [u.a.]: Springer 2012
 - [42] Hahn, U.: Physik für Ingenieure. München [u.a.]: Oldenbourg 2007
 - [43] Windisch, H.: Thermodynamik. Ein Lehrbuch für Ingenieure. Oldenbourg Lehrbücher für Ingenieure. München: Oldenbourg 2011
 - [44] Flemming, M., Roth, S. u. Ziegmann, G.: Faserverbundbauweisen. Fasern und Matrices. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 1995
 - [45] Neitzel, M.: Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung; [Manfred Neitzel zum 80. Geburtstag gewidmet]. München: Hanser 2014
 - [46] Flemming, M., Roth, S. u. Ziegmann, G.: Faserverbundbauweisen. Halbzeuge und Bauweisen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 1996
 - [47] Peters, L.: Begleitende Unterlagen zum Zertifikatsseminar "Composite Manufacturing Specialist". Stade - PFH Campus 2014
 - [48] Hellerich, W., Harsch, G. u. Baur, E.: Werkstoff-Führer Kunststoffe. Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte. München: Hanser 2010
 - [49] Ilschner, B. u. Singer, R. F.: Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik. Eigenschaften, Vorgänge, Technologien; mit 33 Tabellen. Springer-Lehrbuch. Berlin [u.a.]: Springer 2005
 - [50] Flemming, M. u. Roth, S.: Faserverbundbauweisen Eigenschaften. Mechanische, konstruktive, thermische, elektrische, ökologische, wirtschaftliche Aspekte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2003
 - [51] Henning, F. u. Moeller, E.: Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung. München: Hanser 2011
 - [52] Flemming, M., Roth, S. u. Ziegmann, G.: Faserverbundbauweisen. Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 1999
 - [53] Ehrenstein, G. W. u. Pongratz, S.: Beständigkeit von Kunststoffen. eibis e-Bib Projekt. München: Hanser 2007
-

- [54] Menges, G., Michaeli, W. u. Mohren, P.: Anleitung zum Bau von Spritzgiesswerkzeugen. Mit 62 Tabellen. München, Wien: Hanser 1999
 - [55] CTM - Composite Technologie & Material: Ampreg 22 SP Hochleistungs-Epoxy-Laminiersystem. Technisches Datenblatt, 2014.
http://www.ctmat.de/downloads/Ampreg22%20D-S_dt.pdf, abgerufen am: 04.12.2014
 - [56] Barbero, E. J.: Introduction to composite materials design. Boca Raton: CRC Press 2011
 - [57] Elsner, P., Hirth, T. u. Eyerer, P.: Polymer Engineering. Technologien und Praxis (VDI-Buch. VDI-Buch. Dordrecht: Springer 2008
 - [58] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.): Handbuch Faserverbundkunststoffe. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen; mit 46 Tabellen. Praxis. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010
 - [59] R&G: 3 mm Kurzfasern. Technisches Datenblatt, 2015. <http://shop1.r-g.de/art/210100>, abgerufen am: 07.02.2015
 - [60] Leonhardt, F. u. Mönnig, E.: Vorlesungen über Massivbau. Berlin [u.a.]: Springer 1984
 - [61] Marti, P.: Ingenieur-Betonbau. Schriftenreihe / Gesellschaft für Ingenieurbaukunst, Band 7. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich 2005
 - [62] R&G: Glasfaserstäbe. Technisches Datenblatt, 2015. <http://shop1.r-g.de/art/610001>, abgerufen am: 07.02.2015
 - [63] Teschner, R.: Glasfasern. SpringerLink : Bücher. Berlin: Springer Vieweg 2013
 - [64] Bonnet, M.: Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung. Verstehen und zuverlässig auswählen. Studium. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009
 - [65] Eyerer, P., Elsner, P. u. Hirth, T.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2005
 - [66] Baumeister, E.: Hohlkugelkomposit. Charakterisierung thermischer und mechanischer Eigenschaften eines neuen Leichtbauwerkstoffes, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg 2004
 - [67] Brinkmann, T.: Handbuch Produktentwicklung mit Kunststoffen. München [u.a.]: Hanser 2011
 - [68] Bertling, J., Blömer, J. u. Kümmel, R.: Mikrohohlkugeln. Chemie Ingenieur Technik 75 (2003) Nr. 6, S. 669–678
 - [69] 3M: Mikrohohlglaskugeln. Technisches Datenblatt.
<http://multimedia.3m.com/mws/media/860319O/datasheet-glassbubbles-im16k-final-lr-pdf.pdf>, abgerufen am: 13.02.2015
 - [70] R&G: 3M™ Glass Bubbles 0,12 g/cm³. Technisches Datenblatt. <http://shop1.r-g.de/art/210130>, abgerufen am: 13.02.2015
 - [71] Dennert Poraver GmbH: Der Leichtzuschlagstoff für Baustoffe und Industrieprodukte. Technisches Datenblatt, 2015. <http://www.poraver.com/>, abgerufen am: 13.02.2015
-

-
- [72] Dennert Poraver GmbH: Poraver. Technisches Datenblatt, 2015, abgerufen am: 13.02.2015
- [73] Meyer, L.: Zum Einfluss der Kontaktzone bei der Modellierung des Elastizitätsmoduls von Beton, RWTH Aachen 2007
- [74] Fuller, W. B. u. Thompson, S. E.: The Laws of Proportioning Concrete Nr. 509, 1907. cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?268227, abgerufen am: 13.02.2015
- [75] Schornstein, B.: Untersuchung der dynamischen Druckeigenschaften von glasfaserverstärkten Epoxidharzen für Auflagerwerkstoffe, Universität Rostock 2015
- [76] ASTM 3418; 2012. Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry.
- [77] Mezger, T.: Das Rheologie-Handbuch. Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern. Farbe- und Lack-Edition. Hannover: Vincentz Network 2010
- [78] Schramm, G.: Einführung in Rheologie und Rheometrie. Karlsruhe: Thermo Electron 2004
- [79] DIN 1342-1; November 2003. Viskosität - Teil 1: Rheologische Begriffe.
- [80] DIN 54458; März 2013. Strukturklebstoffe - Bestimmung des Fließ- und Applikationsverhaltens von viskoelastischen Klebstoffen mit Hilfe der Oszillationsrheometrie.
- [81] DIN EN ISO 11357-2; September 2013. Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 2: Bestimmung der Glasübergangstemperatur und der Glasübergangsstufen.
- [82] DIN EN ISO 604; Dezember 2002. Kunststoffe - Bestimmung von Druckeigenschaften.
- [83] DIN 65583; April 1999. Faserverstärkte Kunststoffe Bestimmung des Glasübergangs von Faserverbundwerkstoffen unter dynamischer Belastung.
- [84] DIN EN ISO 6721-1; August 2011. Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundlagen.
- [85] ISO 6721-5; Mai 1996. Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften - Teil 5: Biegeschwingung - Erzwungene Schwingungen.
- [86] Grellmann, W. u. Altstädt, V.: Kunststoffprüfung. München [u.a.]: Hanser 2005
- [87] Frick, A. u. Stern, C.: Praktische Kunststoffprüfung. München: Hanser 2011, c 2011
- [88] ISO 3597-3; 2003. Textilglasverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der mechanischen Eigenschaften an Stäben, hergestellt aus roving-verstärktem Harz - Teil 3: Bestimmung der Druckfestigkeit.
- [89] DIN EN ISO 1172; Dezember 1998. Textilglasverstärkte Kunststoffe - Prepregs, Formmassen und Lamine - Bestimmung des Textilglas- und Mineralfüllstoffgehalts; Kalzinierungsverfahren.
- [90] Wilhelmsen, A.: Prüfung und Optimierung von Epoxidharzsystemen mit gerichteten und ungerichteten Füllstoffen, Universität Rostock 2014
- [91] DIN 899-1; Juni 2015. Bestimmung des Kriechverhaltens - Teil 1: Zeitstand-Zugversuch.
-

-
- [92] ASTM D5379; 2012. Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method.
- [93] Manhani, L. G. B., Pardini, L. C. u. Levy Neto, F.: Assesment of tensile strength of graphites by the Iosipescu coupon test. *Materials Research* 10 (2007) No. 3, S. 233–239
- [94] DIN EN ISO 62; Mai 2008. Kunststoffe - Bestimmung der Wasseraufnahme.
- [95] Nowak, K.: Untersuchung des Alterungsverhaltens von mit Kurzfasern verstärkten Epoxidharzen, Universität Rostock 2013
- [96] Hohberg, R.: Zum Ermüdungsverhalten von Beton, Technische Universität Berlin 2004
- [97] Hoffmann, L.: Ermüdungsverhalten glasfaserverstärkter Duroplaste, Universität Erlangen-Nürnberg 1999
- [98] GL Richtlinie IV- Teil 1; 2010. Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen, abgerufen am: 13.08.2015
- [99] DIN EN 12667; Mai 2001. Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät.
- [100] DIN EN ISO 22007; April 2012. Kunststoffe – Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit – Teil 1: Allgemeine Grundlagen (ISO 22007-1:2009).
- [101] Krimmer, A.: Mikromechanische Modellierung von Fasergelege-Kunststoff-Verbunden auf Basis von Normprüfungen unter Berücksichtigung der in-situ Eigenschaften der Matrix, Technische Universität Berlin 2013
- [102] Öchsner, A. u. Augustin, C.: Multifunctional metallic hollow sphere structures. Manufacturing, properties and application. *Engineering materials*. Berlin, London: Springer 2009
- [103] Osswald, T. A. u. Menges, G.: *Material science of polymers for engineers*. Munich [Germany]: Hanser Publishers 2012
- [104] Lange & Ritter: Faserverstärkungen aus Glasfaser. *Technisches Datenblatt*, 2013, abgerufen am: 29.02.2016
- [105] Ferreira, J., Capela, C. u. Costa, J. D.: A study of the mechanical behaviour on fibre reinforced hollow microspheres hybrid composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41 (2010) No. 3, S. 345–352
- [106] Wang, L., Zhang, J., Yang, X., Zhang, C., Gong, W. u. Yu, J.: Flexural properties of epoxy syntactic foams reinforced by fiberglass mesh and/or short glass fiber. *Materials & Design* (2014) No. 55, S. 929–936
- [107] Fröck, L.: Bau und Erprobung einer Form zur Herstellung von Auflagerblöcken für LNG-Tanks aus mit Füllstoffen modifiziertem Epoxidharz, Universität Rostock 2013
- [108] Ehrich, K.: Alternative Support Material for independent LNG tank systems. Center of technical excellence. Seoul, South Korea 2014
- [109] DE102014203351 A1. Auflager zur Lagerung und zur thermischen Isolation von Fluidtanks. Ehrich, K., Fröck, L., Glück, N. u. Wilhelmsen, A. 25.02.2014
-

-
- [110] Ehrich, K.: Neue Werkstoffe für den Einsatz als Auflager in LNG Schiffen. Ingenieurspiegel 2014 (2014) Nr. 2, S. 84–86
- [111] Harris, S.: Best possible support for LNG tanks. LNG World Shipping 2014 No. 12 - December
- [112] Ehrich, K.: Epoxidharz als Alternative für LNG-Tanks. HANSA - International Maritime Journal 153 (2016) 05, S. 74–75
-