

FAT-Schriftenreihe 401

Variable Digitalisierung von Materialkarten für FVK
und ihre Rezyklate



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Projekt „Variable Digitalisierung von Materialkarten für FVK und ihre Rezyklate“ der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. wurde im Rahmen des Förderprogramms „Industrielle Gemeinschaftsforschung“ (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Variable Digitalisierung von Materialkarten für FVK und ihre Rezyklate

Forschungsstellen:

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM

Inhaltsverzeichnis

1	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	3
1.1	Arbeitspaket 1: Rezyklat-Performance	3
1.2	Arbeitspaket 2: Bauteil-Evaluation.....	7
1.3	Arbeitspaket 3: Mikrostruktur und Virtualisierung.....	9
1.4	Arbeitspaket 4: Digitalisierter Werkstoff	16
1.5	Arbeitspaket 5: Digitalisierte Materialkarte.....	17
1.6	Arbeitspaket 6: Adaption von Materialkarten	23
1.7	Arbeitspaket 7: Ressourceneffektivität.....	25
2	Verwendung der Zuwendung	26
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	26
4	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten.....	26
5	Wissenstransfer in die Wirtschaft.....	27
6	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	29
6.1	Durchgeführte Transfermaßnahmen (vom Projektstart bis zum Projektende).....	29
6.2	Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende)	30
7	Danksagung.....	30
8	Literaturverzeichnis	32

1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

1.1 Arbeitspaket 1: Rezyklat-Performance

Im ersten Arbeitspaket wurde die mechanische Performance eines faserverstärkten Kunststoffs im Vergleich zwischen Ausgangsmaterial („virgin“) und drei weiteren Rezyklat-Varianten untersucht. Ziel war es, die Auswirkungen des Rezyklierungsprozesses auf die grundlegenden mechanischen Eigenschaften zu erfassen und quantifizierbar zu machen.

Als Ausgangswerkstoff wurde ein kurzglasfaserverstärktes Polypropylen (PP-GF30) der Firma Celstran verwendet. Das Material enthält einen Glasfaseranteil von 30 Gewichtsprozent, wobei die Glasfasern einen Durchmesser von 19 μm und eine mittlere Länge von ca. 2 mm aufweisen. Aufgrund der Verarbeitung im Spritzgussverfahren ergibt sich eine richtungsabhängige Orientierung der Fasern, was zu einer ausgeprägten Anisotropie sowohl im elastischen als auch im plastischen Werkstoffverhalten führt. Diese Anisotropie ist nicht konstant, sondern variiert lokal in Abhängigkeit von der Strömungsführung des Kunststoffs beim Formfüllvorgang.

Für die erste Rezyklatvariante wurde derselbe Werkstoff nach der Bauteilherstellung mechanisch zerkleinert (geschreddert). Das Material wurde dabei als sogenanntes „pre-consumer recycled material“ definiert, da es keinen vollständigen Lebenszyklus durchlaufen hat. Die Rezyklatproben entstanden ausschließlich aus Produktionsausschuss und wurden nicht mit anderen Werkstoffen oder Kunststofftypen vermischt. Damit konnte sichergestellt werden, dass ausschließlich die mechanischen Einflüsse des Zerkleinerungsprozesses (z. B. Faserbruch, Neuverteilung) auf das Werkstoffverhalten wirken. Dabei wurde bewusst auf chemische oder werkstoffliche Modifizierungen verzichtet, um die isolierte Wirkung des mechanischen Recyclings zu analysieren. Das Material ist in dieser Variante zu 100% rezykliert und nicht mit virgin Material oder virgin Fasern gemischt.

Um dies zu verwirklichen, haben sich drei PA-Mitglieder bereit erklärt das Material bereit zu stellen (Celanese), Platten/Bauteil zu spritzen (Brose), das gespritzte Material zu Rezyklieren (pal plast) und erneut das Mahlgut zu compoundieren (Celanese) und neu zu spritzen (Brose). So konnte der Lebenszyklus direkt durch den PA dargestellt werden und die Veränderung der Werkstoffeigenschaften durch die Forschungsvereinigungen untersucht werden (siehe Abbildung 1).

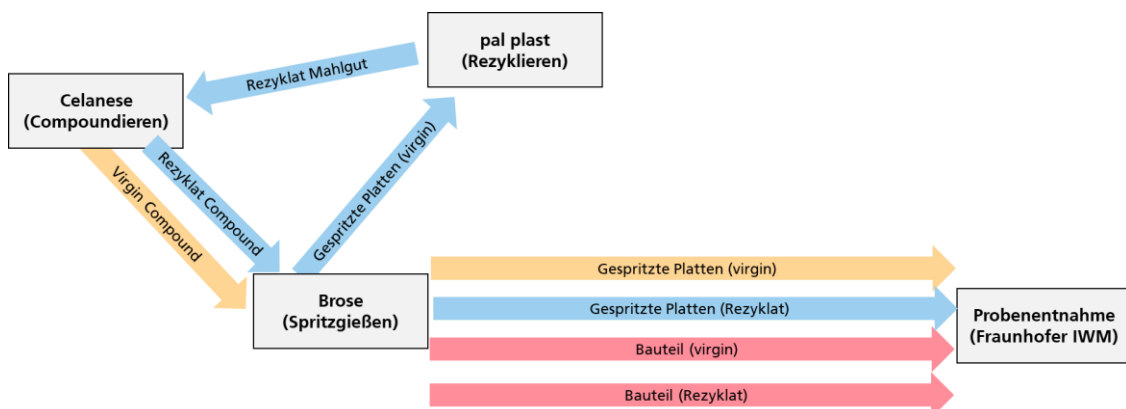


Abbildung 1: Flussdiagramm des Materials.

Beim Recycling von Kunststoffen, die einen Lebenszyklus durchlaufen haben, kommt es oft vor, dass dem Material TiO_2 als Bleichungsmittel hinzugefügt wird, um die Farbneutralität des oft unbekanntes Kunststoffes zu gewährleisten. In der Praxis der Materialhersteller im projektbegleitenden Ausschuss zeigte sich allerdings, dass schon geringe Mengen von TiO_2 eine große Auswirkung auf die Materialperformanz haben. Daher wurde entschieden als zweite Rezyklatvariante den virgin Werkstoff zu nehmen und nur 0,25% TiO_2 hinzuzufügen.

Als dritte Rezyklatvariante soll nun der Einfluss des Lebenszyklus auf die Kunststoffmatrix betrachtet werden. Dazu wurde ein so genannte Post Consumer Rezyklat (PCR) als Kunststoffmatrix im Verhältnis 1:1 mit dem virgin Material vermengt, sodass erneut eine Glasfaseranteil von 30 Gewichtsprozent entsteht. Dabei ist aber zu beachten, dass im PCR bereits TiO_2 enthalten ist. Der Effekt des gealterten Kunststoffes und von TiO_2 ist bei dieser Variante also überlagert zu erwarten. Die genaue Zusammensetzung des PCRs ist aufgrund seines Ursprungs unbekannt, was aber genau die Absicht dieser Herangehensweise war.

Zur Charakterisierung wurden Zugversuche an Plattenproben durchgeführt, wobei die Proben jeweils in Fließrichtung entnommen wurden. Die Versuche wurden bei quasistatischer Dehnungsgeschwindigkeit durchgeführt. Für alle Werkstoffzustände (Ausgangsmaterial und Rezyklate) wurden jeweils sechs Zugversuche durchgeführt, um eine ausreichende statistische Aussagekraft zu gewährleisten.

Die ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven zeigen für das mechanische Rezyklat im Vergleich zum Ausgangswerkstoff ein insgesamt ähnliches, jedoch leicht abgeschwächtes mechanisches Verhalten. Der E-Modul des mechanischen Rezyklats lag im Mittel geringfügig unter dem des Ausgangswerkstoffs. Beide Werte lagen jedoch innerhalb der jeweiligen Standardabweichung, sodass die Unterschiede statistisch nicht signifikant sind. Auffällig war eine geringere Streuung der Messergebnisse beim mechanischen Rezyklat. Dies wird auf die größere Varianz der Faserorientierung im Spritzgussteil zurückgeführt. Im Rezyklat sind durch den Zerkleinerungsprozess die ursprünglich längeren Fasern häufiger gebrochen worden, was zu einer homogeneren, aber auch etwas kürzeren mittleren Faserlänge führte und somit zu einem insgesamt gleichmäßigeren, aber mechanisch leicht abgeschwächten Werkstoffverhalten. Die Tests mit dem mechanischen Rezyklat zeigten eine frühere plastische Verformung und eine geringere maximale Zugspannung im Vergleich zum Ausgangswerkstoff. Dies deutet darauf hin, dass die Materialfestigkeit durch den mechanischen Rezyklierungsprozess leicht abnimmt.

Für die Rezyklatvariante mit TiO_2 sind Elastizität und Plastizität vergleichbar mit dem virgin Werkstoff, aber die Versagensdehnung ist deutlich geringer. Das PPGF30% mit PCR verhält sich im elastischen Bereich erneut sehr ähnlich zum virgin Material, hat aber ebenfalls eine geringere Versagensspannung und -dehnung. Auch die plastische Deformation setzt hier etwas früher ein.

Es wurden außerdem Versuche am reinen Matrixmaterial durchgeführt, um den Unterschied abschätzen zu können zwischen klassischem PP und dem unbekanntes PCR (siehe Abbildung 5). Die Eigenschaften unterschieden sich deutlich. Elastizität, maximale Spannung und Versagensdehnung liegen beim PCR jeweils deutlich unterhalb der Eigenschaften des virgin PP.

Diese Ergebnisse liefern eine quantitative Basis für die spätere virtuelle Parametrierung in AP3 und AP5. Zudem zeigen sie exemplarisch, dass die mechanischen Eigenschaften durch das mechanische Recycling in relevantem, aber vorhersagbarem Maße verändert werden. Die geringere Streuung im Rezyklat könnte in zukünftigen Anwendungen sogar Vorteile bieten, wenn die Reduktion der maximalen Festigkeit durch gezielte Auslegung kompensiert wird.

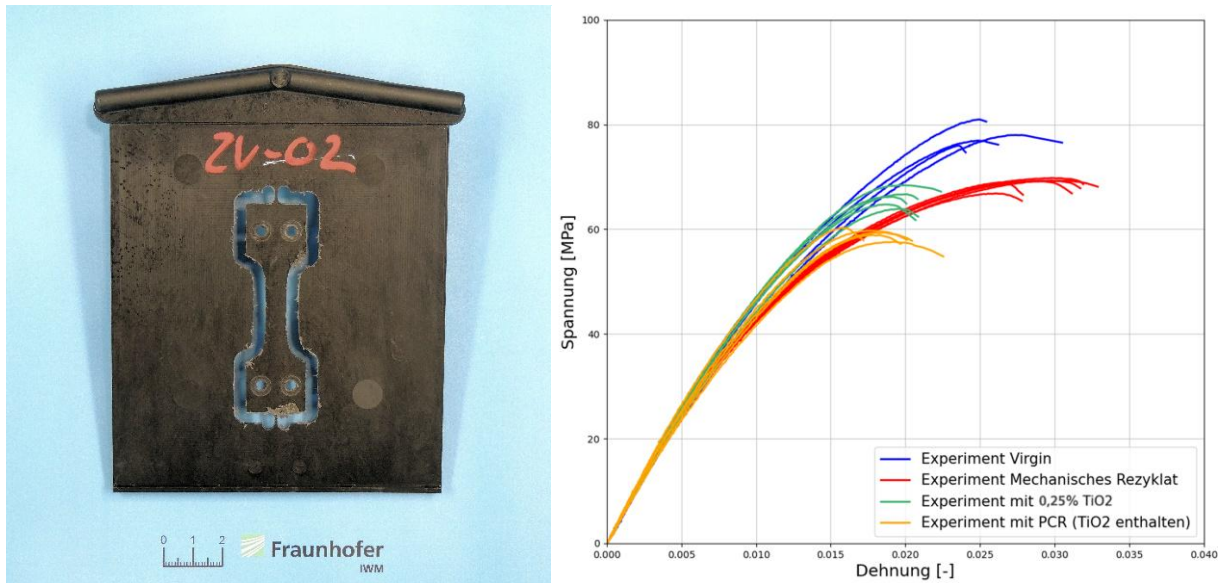


Abbildung 2: links) Probenentnahme der Zugproben aus den gespritzten Platten; rechts) Vergleich der experimentellen Spannungs-Dehnungskurven der vier Materialvarianten

virgin	σ_{max}	E-Modul	mechanisches Rezyklat	σ_{max}	E-Modul
Probennummer	[MPa]	[MPa]	Probennummer	[MPa]	[MPa]
AZL_ZV_01	80	4729	AZL_ZR_01	67	4741
AZL_ZV_02	84	6002	AZL_ZR_02	69	4972
AZL_ZV_03	77	5197	AZL_ZR_03	69	4991
AZL_ZV_04	81	5015	AZL_ZR_04	69	4800
AZL_ZV_05	78	4686	AZL_ZR_05	70	4894
AZL_ZV_06	76	4702	AZL_ZR_06	69	4857
Mittelwert	79	5055	Mittelwert	69	4876
Standardabweichung	3	507	Standardabweichung	1	97

TiO2	σ_{max}	E-Modul	PCR	σ_{max}	E-Modul
Probennummer	[MPa]	[MPa]	Probennummer	[MPa]	[MPa]
AZL_ZTIO_01	68	5251	AZL_ZPCR_01	60	4903
AZL_ZTIO_02	65	5181	AZL_ZPCR_02	59	4851
AZL_ZTIO_03	64	5019	AZL_ZPCR_03	59	4887
AZL_ZTIO_04	67	5207	AZL_ZPCR_04	60	5224
AZL_ZTIO_05	66	5270	AZL_ZPCR_05	58	4711
Mittelwert	66	5186	Mittelwert	59	4915
Standardabweichung	2	100	Standardabweichung	1	188

Ferner wurden Mikrozugversuche an den Materialvarianten virgin, mechanisch rezykliert und PCR durchgeführt. Aufgrund der geringen Probengröße ermöglichen diese Versuche einen vollständigen CT-Scan der Probe, um so die vorliegende Faserverteilung in Gänze aufzulösen und entsprechende Simulationen in AP3 zu ermöglichen. Untenstehende Abbildung 3 gibt einen Überblick über Probengeometrie und Versuchsaufbau. Die Ergebnisse der quasistatischen Mikrozugversuche sind in Abbildung 4 dargestellt.

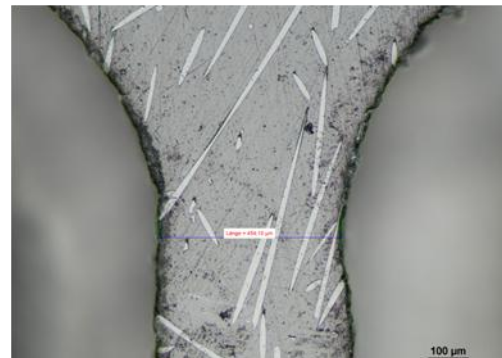
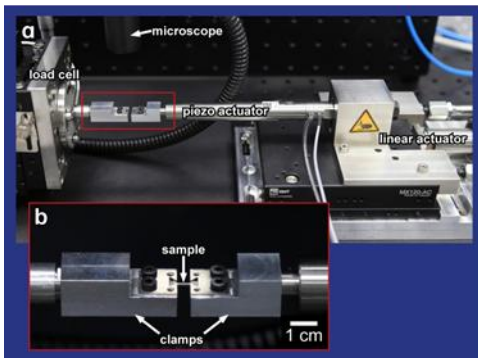
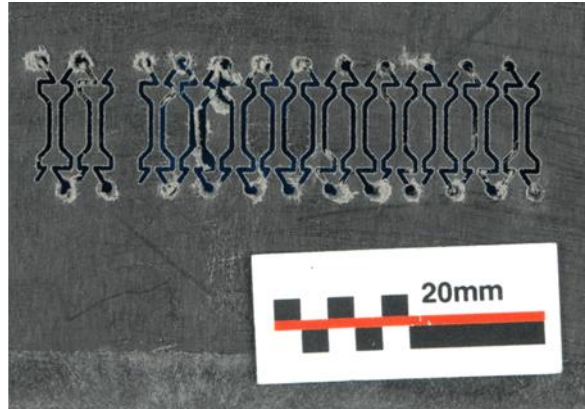
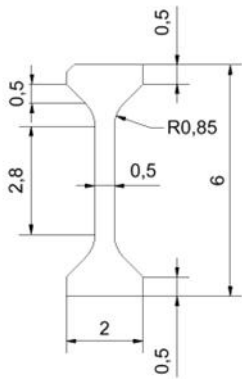


Abbildung 3: Dimensionen und Entnahmepositionen der Mikrozugproben (oben). Mikrozugprüfstand und CT-Scan einer Probe (unten).

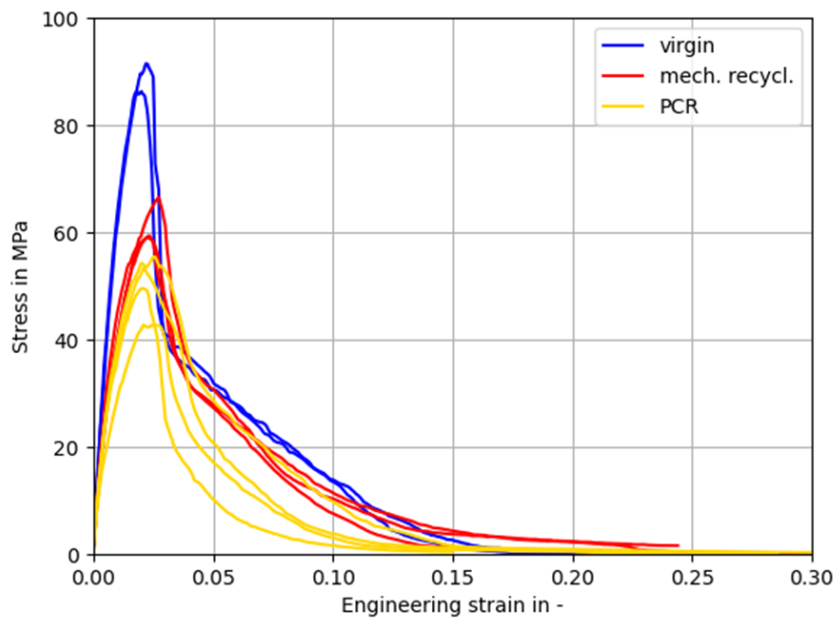


Abbildung 4: Spannungs-Dehnungs-Kurven ermittelt im Mikrozugversuch für die Materialvarianten virgin, mechanisch rezykliert und PCR.

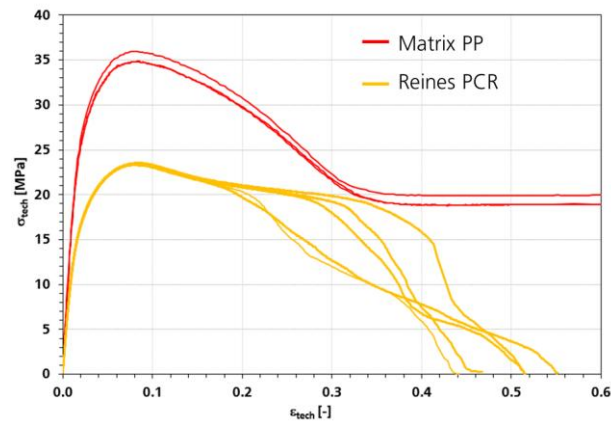


Abbildung 5: Vergleich der experimentellen Spannungs-Dehnungskurven des reinen Matrixmaterial

Die in AP1 gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die mikroskalige Modellbildung in AP3 sowie für die Trainingsdaten des neuronalen Netzes in AP5. Die Mikrozugversuche mit digitaler Bildkorrelation (DIC), wurden zusätzlich zur lokalen Validierung der Mikrostrukturmodelle herangezogen. Die hier gewonnenen Daten werden zur Verbesserung der Prognosemodellen für die Performance rezyklierter Werkstoffe herangezogen und ermöglichen somit eine ressourcenschonende und zugleich zuverlässige Materialauslegung.

1.2 Arbeitspaket 2: Bauteil-Evaluation

Ziel von Arbeitspaket 2 war es, die in AP1 beobachteten Unterschiede zwischen dem Ausgangswerkstoff und Rezyklaten auf **Bauteilebene** zu übertragen und zu analysieren. Das wurde exemplarisch für die Rezyklatvariante mit mechanischem Rezykling durchgeführt. Dabei sollten sowohl die strukturelle Leistungsfähigkeit der Materialien im realitätsnahen Lastfall als auch die Eignung der Bauteilversuche zur **Validierung der digital erstellten Materialkarten** (AP5/AP6) überprüft werden.

Für die Versuche wurde ein komponentennahes Prüfbauteil gewählt, das sowohl typische geometrische Eigenschaften aus der industriellen Anwendung besitzt als auch eine mechanisch aussagekräftige Belastung ermöglicht. Die gewählte Geometrie bestand aus einer rechteckigen Platte mit einem aufgesetzten Steg (siehe Abbildung 3). Diese Form orientiert sich an Bauteilen aus dem Bereich der Fensterheberführung in Fahrzeugtüren, die in ähnlicher Form im Serieneinsatz sind.

Um eine komplexere, mehrachsige Spannungsverteilung zu erzeugen als in einem Zugversuch, wurde ein **Vier-Punkt-Biegeversuch** durchgeführt. Dabei wurde auf eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Biegebelastung geachtet, sodass der Einfluss der Bauteilgeometrie im Vergleich zum Werkstoffverhalten in den Hintergrund tritt. Die Vierpunkt-Anordnung erzeugt eine größere aktive Deformationszone als ein Dreipunktversuch und ist dadurch besonders geeignet für die differenzierte Analyse von plastischem Materialverhalten.

Die Versuche wurden quasistatisch mit konstanter Stempelgeschwindigkeit durchgeführt. Jeweils drei Wiederholungen pro Konfiguration und Werkstoffzustand wurden durchgeführt, um eine statistische Auswertung zu ermöglichen. Untersucht wurden zwei Lastanordnungen: Zum einen mit dem **Steg oben**. Der Stempel

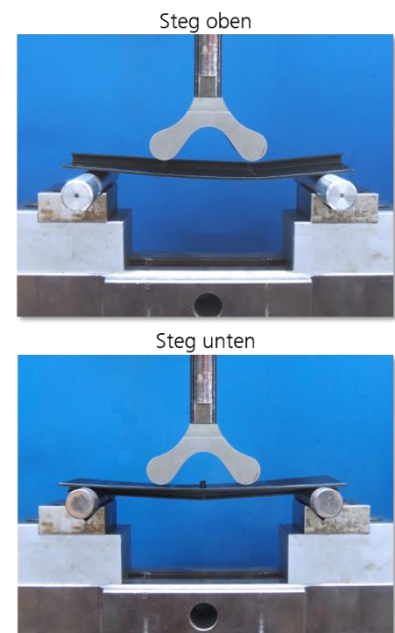


Abbildung 6: Konfiguration der 4-Punkt-Biege-Versuche

wirkt dabei direkt auf den Steg; die Biegebeanspruchung konzentriert sich auf die Schweißnahtähnliche Verbindung zwischen Steg und Grundplatte. Zum anderen mit **Steg unten**. Dabei liegt der Steg zwischen den beiden unteren Auflagen frei und wird nicht direkt belastet. Die Biegung wirkt primär auf die Grundplatte.

Diese Anordnungen erlauben Rückschlüsse sowohl auf die Festigkeit des Materials selbst als auch auf das Verhalten in strukturell kritischen Bereichen (z. B. kerbähnliche Geometrien wie der Steg).

Die gemessenen **Kraft-Weg-Kurven** (siehe Abbildung 4) zeigen ein konsistentes Bild, das die Ergebnisse aus AP1 auf der Bauteilebene bestätigt. Die initiale Steifigkeit unterscheidet sich bei beiden Werkstoffen nur geringfügig. Die E-Modul-Ähnlichkeit aus den Zugversuchen spiegelt sich somit auch im Bauteilverhalten wider. Beim mechanisch rezyklierten Material setzt die plastische Deformation deutlich früher ein als beim Ausgangswerkstoff. Die maximale Kraftaufnahme ist bei den Rezyklat-Bauteilen ebenfalls reduziert.

In der Anordnung **mit Steg unten** kam es bei beiden Werkstoffen zu einem spontanen, spröden Versagen in Form eines einzigen durchgehenden Risses. Die Versagenslast war beim Rezyklat signifikant geringer. In der Anordnung **mit Steg oben** trat zunächst ein lokaler Riss im Stegbereich auf, gefolgt von einem charakteristischen Kraftplateau. Beim virgin-Material verlief dieses Plateau klar definiert, während es beim mechanischen Rezyklat weicher und flacher ausgeprägt war, mit einem verzögerten Übergang nach dem ersten Rissereignis. Dies deutet auf eine leicht veränderte Energieaufnahme und Rissfortpflanzungsmechanik hin. Analog zu den Zugversuchen war die Streuung der Ergebnisse beim Rezyklatmaterial geringer, was erneut auf eine homogenere, wenngleich mechanisch leicht schwächere Struktur hinweist.

Die Bauteilversuche bestätigen die **Übertragbarkeit der werkstoffspezifischen Unterschiede** aus AP1 auf eine praxisnahe Anwendungsebene. Die Rezyklate zeigen zwar ein insgesamt geringeres Kraftaufnahmevermögen und ein früheres Einsetzen plastischer Deformation, das Verhalten bleibt jedoch konsistent und vorhersagbar. Diese Versuche stellen eine **wichtige Validierungsbasis** für die später entwickelten digitalen Materialkarten (AP5/AP6) dar. Sie ermöglichen eine Gegenüberstellung der realen Bauteilreaktion mit den Ergebnissen aus simulationsgestützter Materialparametrierung und sind damit ein zentrales Bindeglied zwischen experimenteller Charakterisierung und digitalem Zwilling.

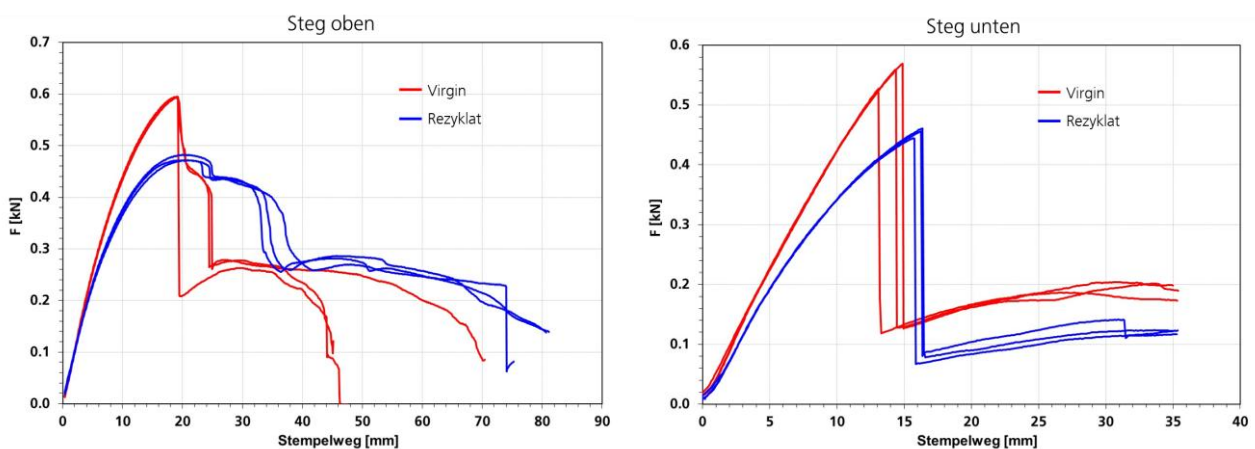


Abbildung 7: Vergleich der experimentellen Spannungs-Dehnungskurven des 4-Punkt-Biege-Versuchs mit Virgin und mechanisch rezyktem PPGF30. links) Steg oben. rechts) Steg unten.

1.3 Arbeitspaket 3: Mikrostruktur und Virtualisierung

Im diesem Arbeitspaket wurde ein Modellierungsansatz entwickelt, um das mechanische Verhalten von glasfaserverstärktem Polypropylen (PP-GF) und dessen Rezyklaten effizient auf der Mikroskala zu charakterisieren.

Kernidee ist die getrennte Behandlung der Einflussgrößen:

- Änderungen der **Faserlängenverteilung (FLV)** durch mechanisches Recycling oder die Zugabe von TiO_2 ,
- Änderungen der **Matrixeigenschaften** durch den Einsatz von PCR-Material.

Hierfür werden realistische Mikrostrukturen erzeugt, deren Antwort auf verschiedene Belastungszustände numerisch bestimmt und in Form von Materialmodellen für die Makroskala nutzbar gemacht wurde.

Dabei kamen zwei am Fraunhofer ITWM entwickelte Software-Tools zum Einsatz: FiberMath (Fraunhofer ITWM 2025b) und FeelMath (Fraunhofer ITWM 2025a). FiberMath erzeugt Repräsentative Volumenelemente (RVE) auf Voxelbasis mit hohen Faservolumengehalten, vorgegebener Faserorientierung und vorgegebener Faserlängenverteilung.

FeelMath erlaubt die effiziente Berechnung von Steifigkeit und nichtlinearer Deformation unter Zug- und Schubbelastung auf den von FiberMath erzeugten Voxelstrukturen. Dabei werden getrennte Materialmodelle für Matrix und Fasern verwendet. Während für die Fasern linear-elastisches Verhalten angenommen wird, berücksichtigt das Matrixmodell nichtlineare Effekte (Plastizität und Schädigung).

Der Vorteil der virtuellen Generierung ist, dass die Fasergeometrie in den virtuellen Proben exakt bekannt ist und systematisch variiert werden kann (Grimm-Strele et al. 2022).

Geometrische Charakterisierung

Die Faserorientierung in den gespritzten Platten wurde mittels CT-Scans am ITWM bestimmt. Drei Positionen auf der Platte wurden untersucht (siehe Abbildung 8).

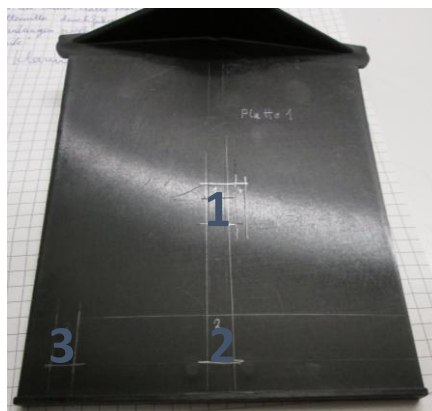


Abbildung 8: Plattenprobe und Position der CT-Scans.

Der Verlauf der Komponente des Faserorientierungstensors, die der Spritzgussrichtung entspricht (0° -Richtung), ist in Abbildung 9 dargestellt.

- Die Faserorientierung in 0° -Richtung unterscheidet sich nur geringfügig zwischen den untersuchten Varianten (virgin, mechanisch rezykliert, TiO_2 , PCR).

- Die Dicke und Orientierung der Mittelschicht sind über die Plattenpositionen hinweg nahezu identisch.
- Lediglich an Position 2 zeigt das virgin Material eine etwas schwächere Faserorientierung.

Die Segmentierung der CT-Scans und die Auswertung der Faserorientierung wurde mit GeoDict durchgeführt (Math2Market GmbH 2023).

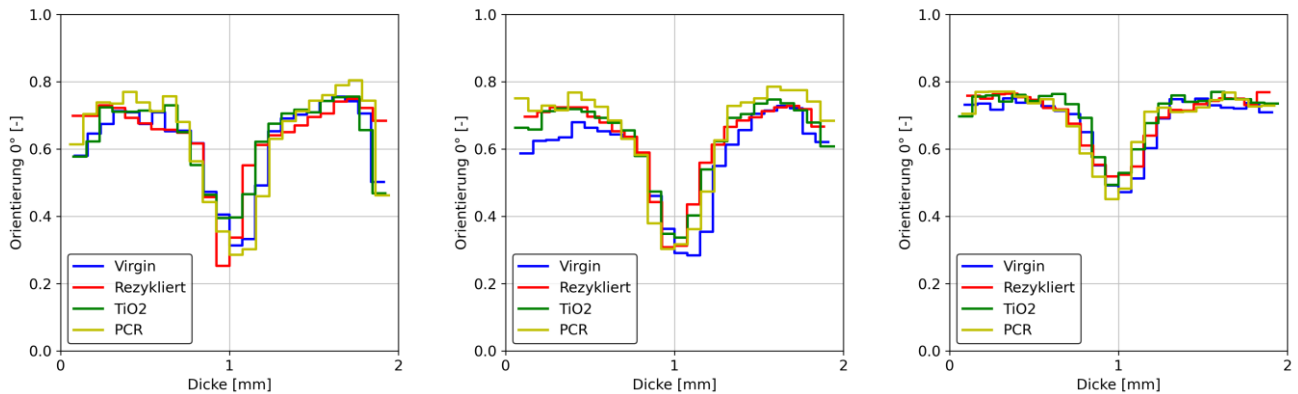


Abbildung 9: Verlauf der Faserorientierung über die Plattendicke. Links: Position 1. Mitte: Position 2. Rechts: Position 3.

Mit der am Fraunhofer ITWM entwickelten Software FLUID (Fraunhofer ITWM 2025c) wurde eine Spritzguss-simulation mit acht Elementen über der Plattendicke durchgeführt und anhand der CT-Ergebnisse validiert. Dabei wurden die aus einem Vorgängerprojekt bekannten Viskositätsdaten (Sabic STAMAX) verwendet.

Die Faserlängenverteilung wurde mittels Veraschungsexperimenten (FASEP) bestimmt. Hierbei wurden Proben in Angussnähe (near gate) und entfernt vom Anguss (far gate) untersucht.

Die Auswertung zeigt, dass die Fasern durch mechanisches Recycling im anzahlgewichteten Mittel um etwa 50 % verkürzt werden. Auch für das Material, dem TiO₂ beigemischt wurde, liegt die Faserlänge im anzahlgewichteten Mittel über 20 % niedriger als für das virgin Material. Anzahl- und längengewichtetes Mittel sind für alle Varianten in Abbildung 10 dargestellt.

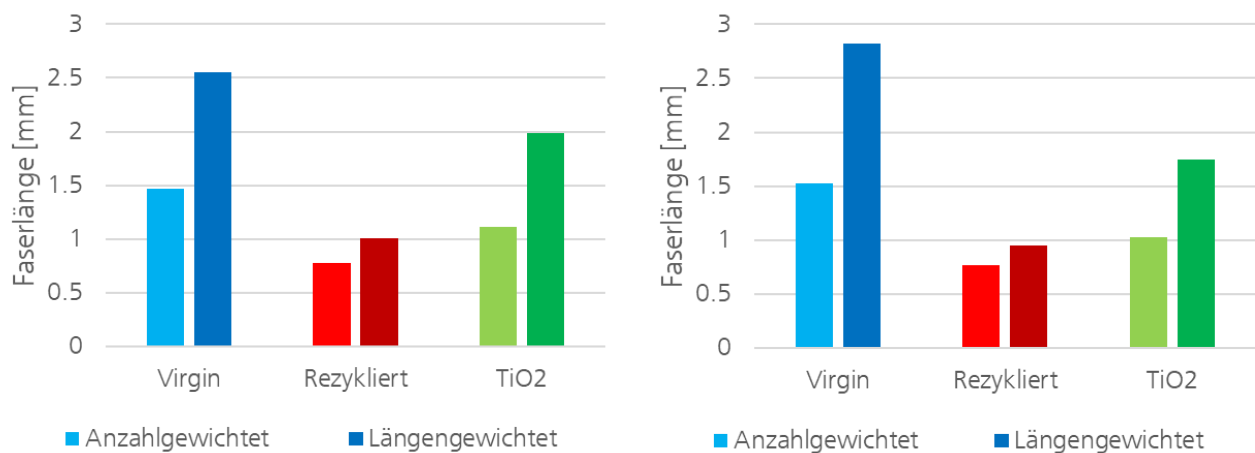


Abbildung 10: Mittlere Faserlängen für das virgin-Material (blau), das mechanische Rezyklat (rot) und das Material mit TiO₂ (grün). Links: near gate, rechts: far gate.

Fitting der Faserlängenverteilung und Erzeugung der Mikrostrukturen

Zur Erzeugung realistischer Mikrostrukturen wurde die gemessene Faserlängenverteilung durch eine Kombination aus Weibull- und Normalverteilung angenähert (Krier et al. 2026). In den mit FiberMath erzeugten virtuellen Strukturen werden die Faserlängen entsprechend dieser Verteilung gezogen. Die Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Parameter der Faserlängenverteilungen.

Parameter	Einheit	Virgin	Rezykliert	TiO ₂
Weibull-Mittelwert	µm	1230	603	1837
Weibull-Standardabweichung	µm	495	93	1231
Normal-Mittelwert	µm	0	831	803
Normal-Standardabweichung	µm	2649	402	118
Gewichtungsfaktor	–	1	0,3839	0,5743

Die Dichtefunktionen für alle drei untersuchten Materialvarianten werden in Abbildung 11 gegenübergestellt.

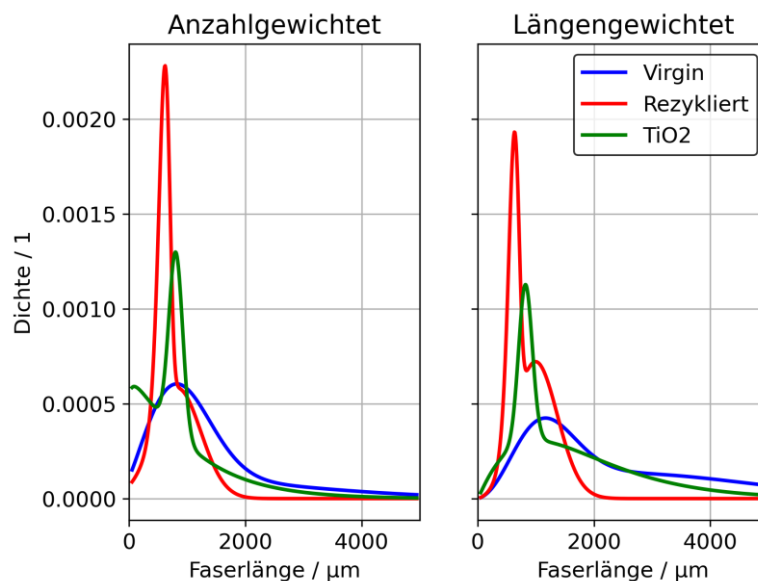


Abbildung 11: Vergleich der Dichtefunktionen für die Faserlängenverteilungen der untersuchten Materialvarianten.

Damit liegen alle Inputdateien vor, um virtuelle Volumenelemente für alle betrachteten Materialvarianten mit FiberMath zu erzeugen. Für die Faserorientierung wurde eine typische 3 Schicht-Struktur angenommen (basierend auf der CT-Analyse). Für die PCR- und die TiO₂-Variante des Werkstoffs wurde die identische Faserlängenverteilung verwendet. Als Faserdurchmesser wurde 20 µm angenommen.

Materialmodell für die Matrix

In den virtuellen erzeugten Volumenelementen ist jeder Voxel entweder der Faser oder der Matrix zugeordnet. Für die Fasern wird linear-elastisches Verhalten ($E = 72 \text{ GPa}$, $\nu = 0,22$) angenommen. Für die Matrix wird ein isotropes elastoplastisches Materialmodell mit Schädigung verwendet. Die Materialparameter können durch unterschiedliche Methoden bestimmt werden.

Zunächst wurden die linear-elastischen Parameter aus Zugversuchen am reinen Matrixmaterial bestimmt ($E = 1353 \text{ MPa}$, $\nu = 0,45$). Zyklische Belastungs-Entlastungsversuche am reinen Matrixmaterial erlauben, Plastizität und Schädigung verlässlich zu kalibrieren (Andrä et al. 2019). Allerdings kann sich das Matrixmaterial im Verbundwerkstoff anders verhalten als in der Messung am reinen Matrixmaterial (Wetzel et al. 2025). Daher wurden die plastischen Parameter invers an Zugversuchen am Verbundwerkstoff angepasst. Die Schädigungsparameter blieben unverändert. Die inverse Kalibrierung verbessert die Übereinstimmung mit den Zugversuchen des Verbundwerkstoffs, wie in Abbildung 12 zu erkennen. Die Parameter sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

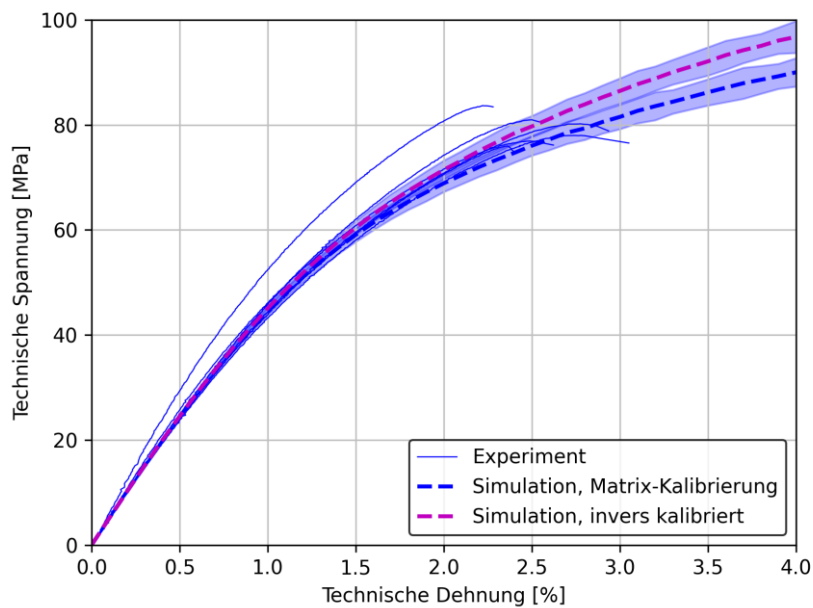


Abbildung 12: Vergleich der Simulationsergebnisse für das virgin Material mit unterschiedlichen Materialmodellen für die Matrix mit den Messungen.

Mit dem kalibrierten nichtlinearen Materialmodell für die Matrix wurden virtuelle Zugversuche auf den verschiedenen virtuellen Volumenelementen durchgeführt. Die Spannungs-Dehnungskurven sind in Abbildung 13 den Messungen gegenübergestellt. Die Simulationen zeigen:

- Das anisotrope Deformationsverhalten wird für alle Varianten mit guter Genauigkeit vorhergesagt.
- Für das mechanisch rezyklierte Material werden die Spannungen bei großen Dehnungen leicht überschätzt.
- Für das TiO_2 -haltige Material bilden die Simulationsergebnisse als untere Schranke des beobachteten Materialverhaltens.
- Das Versagen wird in diesen Simulationen nicht explizit vorhergesagt.

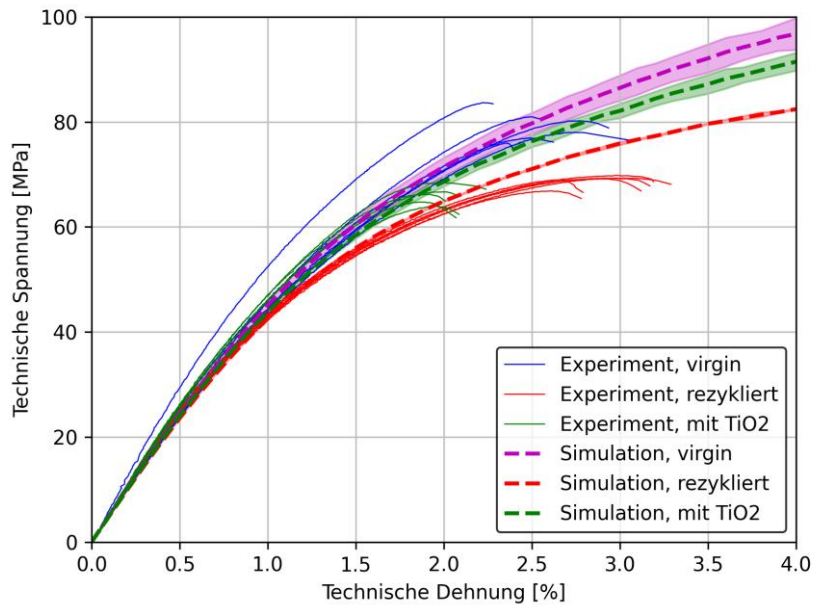


Abbildung 13: Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven aus der Mikroskalensimulation mit den Messungen.

Das PCR-Material zeigt im Versuch einen deutlich früheren Fließbeginn und eine stärkere Plastifizierung als das virgin PP. Daher wurden die plastischen Parameter der PCR-Matrix ebenfalls invers am Verbundwerkstoff kalibriert, bei unveränderten Schädigungsparametern und gleichen elastischen Parametern. Mit den so gewonnenen Parametern erhält man eine untere Schranke für das mechanische Verhalten des PCR-Materials, unter der Annahme, dass die Faserlängenverteilung im PCR-Material identisch ist wie für das TiO₂-Material.

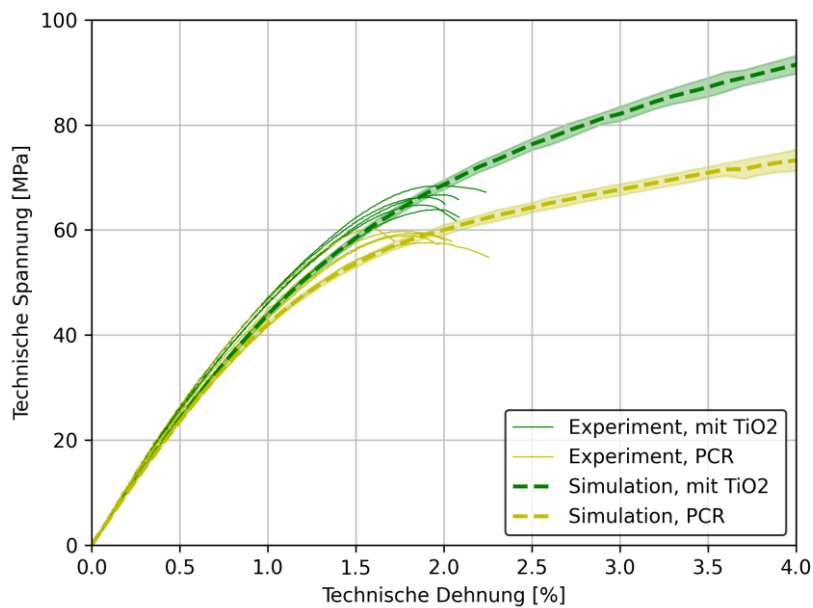


Abbildung 14: Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven für das PCR-Material mit den Messungen.

Die vollständige Parametrisierung der Matrixmaterialien ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

Alternativ können Mikrozugversuche zur Kalibrierung der Materialparameter verwendet werden (Fliegener et al. 2017).

Tabelle 2: Parameter der Matrixmaterialmodelle.

Material	Kalibrierung	σ_Y / MPa	a_1 / MPa	a_2 / -	Y_0 / MPa	b_1 / MPa ⁻¹	b_2 / -
Virgin PP	Matrixmesung	4,84	44,36	329,56	$1,415 \cdot 10^{-3}$	0,765562	1,00108
Virgin PP	Invers am Verbund	6,29	48,79	329,56	$1,415 \cdot 10^{-3}$	0,765562	1,00108
PCR PP	Invers am Verbund	3,87	35,49	329,56	$1,415 \cdot 10^{-3}$	0,765562	1,00108

Virtuelle Tests

Für das PCR-Material wurden virtuelle Tests mit 5 Faserorientierungen und 3 Faservolumengehalten durchgeführt (Grimm-Strele et al. 2022). Die Mikrostrukturen wurden mit einer Auflösung von $1,333 \mu\text{m}$ ($3600 \times 3600 \times 1500$ Voxel) erzeugt und anschließend virtuell getestet (Zug in 0°-Richtung, Zug in 90°-Richtung, Schubversuch).

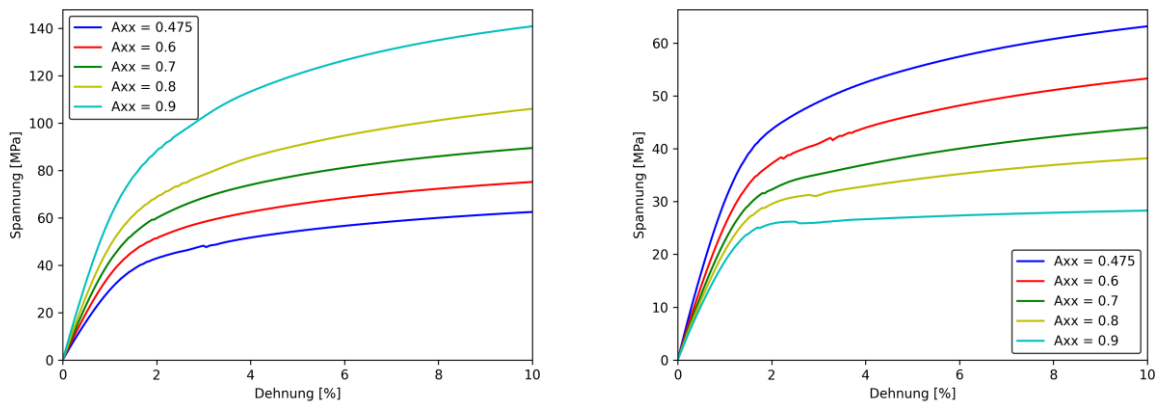


Abbildung 15: Ergebnisse der virtuellen Zugversuche für das PCR-Material für einen Faservolumengehalt von 13 %.

In Abbildung 15 sind exemplarisch die Ergebnisse der Zugversuche für einen Faservolumengehalt von 13 % gegenübergestellt. Die Simulationen zeigen ein deutlich weiches und stärker plastifizierendes Verhalten im Vergleich zum virgin Material, konsistent mit den Kalibrierungsergebnissen.

Zur Abbildung eines „virtuellen PCR-Materials“ wurde die verkürzte Faserlängenverteilung des mechanisch rezyklierten Materials mit einem PCR-ähnlichen Matrixverhalten kombiniert. Die Parameter sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Materialparameter für das "virtuelle PCR-Material".

Material	FLV	E / MPa	σ_Y / MPa	a_1 / MPa
Mech. rezykliert	Rezykliert	1353	6,29	48,79

PCR	TiO ₂	1353	3,87	35,49
Virtuelles PCR	Rezykliert	1082,4	3,39	31,05

Mittels Mikroskalensimulation auf den Volumenelementen mit der Faserlängenverteilung des mechanischen Rezyklats kann die mechanische Performance des virtuellen PCR-Materials abgeschätzt werden. Gegenüber dem mechanisch rezyklierten Material mit virgin PP führt das virtuelle PCR-Material zu deutlich geringerer Steifigkeit und stärkerer Plastifizierung, wie in Abbildung 16 dargestellt.

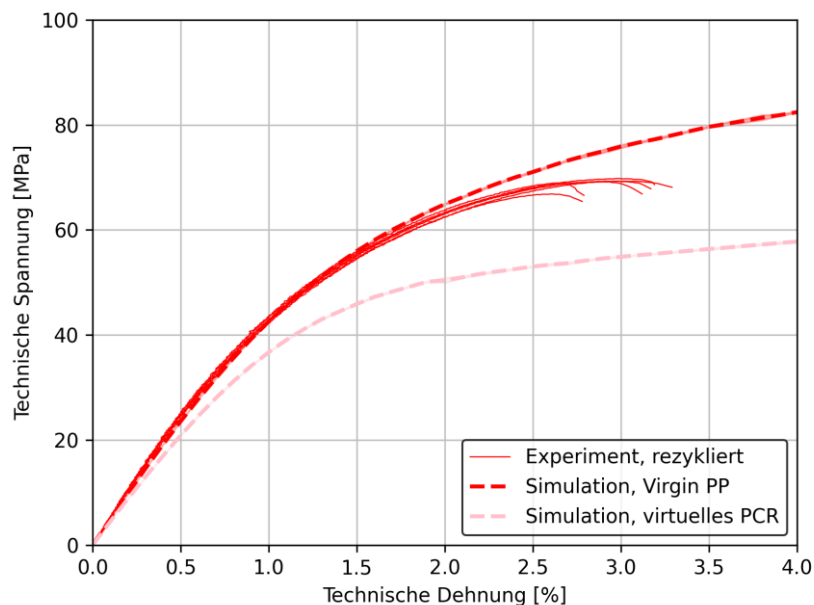


Abbildung 16: Spannungs-Dehnungskurve für das virtuelle PCR-Material im Vergleich mit dem mechanischen Rezyklat.

Auf Basis von Literaturdaten (Chen et al. 2020) wurde der Einfluss zusätzlicher Rezyklierungsschritte auf die Faserlängenverteilung abgeschätzt. Dabei wurde angenommen, dass die mittlere Faserlänge nach dem ersten Rezyklierungsschritt gleichmäßig weiter abnimmt. Die Entwicklung der Faserlänge orientiert sich an publizierten experimentellen Daten. Mit diesen angenommenen Verteilungen wurden virtuelle Mikrostrukturen erzeugt und deren Steifigkeit sowie maximale Spannung berechnet. Die relative Änderung gegenüber dem virgin Zustand ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass zusätzliche Rezyklierungsschritte insbesondere die Festigkeit deutlich stärker reduzieren als die Steifigkeit.

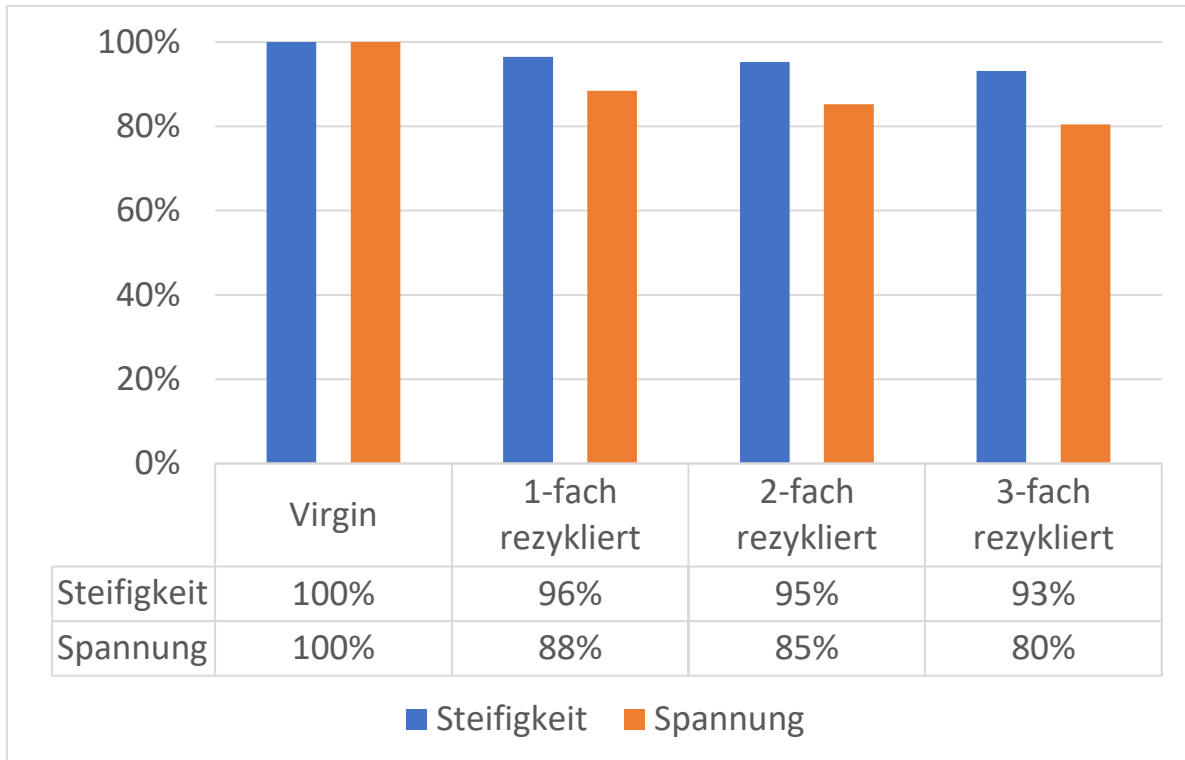


Abbildung 17: Abnahme von Steifigkeit und maximaler Spannung für mehrfaches mechanisches Rezyklieren.

Zusammenfassung der virtuellen Materialcharakterisierung auf der Mikroskala

Mit Hilfe von Mikroskalenmodellen wurde untersucht, wie sich die Verwendung von Rezyklat auf das mechanische Verhalten von Verbundwerkstoffen auswirkt. Basierend auf einer Bestimmung der Faserorientierung durch CT-Aufnahmen und der Faserlängenverteilung mittels Veraschung wurden realistische Volumenelemente erzeugt. Während die Faserorientierung ist für alle untersuchten Materialvarianten sehr ähnlich ist, liegt der wesentliche Unterschied in der Faserlängenverteilung und den Matrixmaterialeigenschaften. Durch inverse Kalibrierung der Materialmodelle für die Matrix am Verbundwerkstoff werden das anisotrope Deformationsverhalten und die nichtlineare Antwort der Verbunde gut wiedergegeben. Mechanisches Recycling und PCR-Einsatz führen zu einer deutlich veränderten Matrixplastizität und, insbesondere bei mehrfacher Rezyklierung, zu reduzierter Festigkeit infolge verkürzter Fasern. Virtuelle Tests ermöglichen eine automatisierte und effiziente Kalibrierung von Materialkarten bei gleichzeitig exakter Kenntnis der zugrunde liegenden Mikrostruktur.

1.4 Arbeitspaket 4: Digitalisierter Werkstoff

Ziel dieses Arbeitspakets war es, ein digitales Abbild des Werkstoffs zu erstellen, das sowohl mechanische als auch mikrostrukturelle Eigenschaften in einem einheitlichen Datenraum vereint. Hierzu wurden experimentell und numerisch gewonnene Daten über das Material in der eigens entwickelten Softwareplattform MaterialDataFusion (MDF) zusammengeführt.

Die Fusion der Daten erfolgte anhand eines standardisierten geometrischen Datencontainers, der auf einer Mikroprobe basiert. Diese Probe diente als gemeinsame Referenz für bildgebende Verfahren, mechanische Messungen und Simulationsergebnisse. Dabei kamen insbesondere 3D-CT-Daten, rekonstruierte

Faserorientierungen, lokal aufgelöste experimentelle Dehnungsfelder (z. B. aus DIC-Messungen) sowie simulierte Spannungs- und Dehnungsverteilungen zum Einsatz (siehe Abbildung 18).

Die Software MDF ermöglicht es, alle Datenquellen geometrisch zu registrieren und in ein diskretisiertes Informationsnetz zu überführen, das konzeptionell einem Finite-Elemente-Netz ähnelt. Jeder Knotenpunkt dieses Netzes erhält eine eindeutige ID mit drei Raumkoordinaten sowie zugeordnete skalare oder tensorielle Informationen (z. B. Spannungen, Dehnungen, Faserorientierungen). Auch zeitabhängige Daten können durch Auswahl geeigneter Zeitschritte integriert werden.

Im Gegensatz zu einer rein deskriptiven Datensammlung an einem Einzelbauteil, wie sie exemplarisch in früheren Arbeiten mit einer Sitzschale erfolgte, stand im Projekt VaDiMat die Flexibilität und Wiederverwendbarkeit des digitalen Werkstoffmodells im Vordergrund. MDF erlaubt es, Daten unterschiedlicher Herkunft (z. B. andere CT-Scans, andere Mikrostrukturen oder neue Versuchsergebnisse) schnell zusammenzuführen und gezielt für die modellgestützte Parametrisierung (vgl. AP5) vorzubereiten.

Zur Sicherstellung der Wiederverwendbarkeit wurde zudem großer Wert auf eine strukturierte Dateninfrastruktur gelegt: Alle Datensätze werden automatisiert mit Metainformationen im JSON-Format verknüpft und versioniert abgelegt. Dies ermöglicht eine reproduzierbare Weiterverarbeitung und Analytik in nachfolgenden Arbeitspaketen.

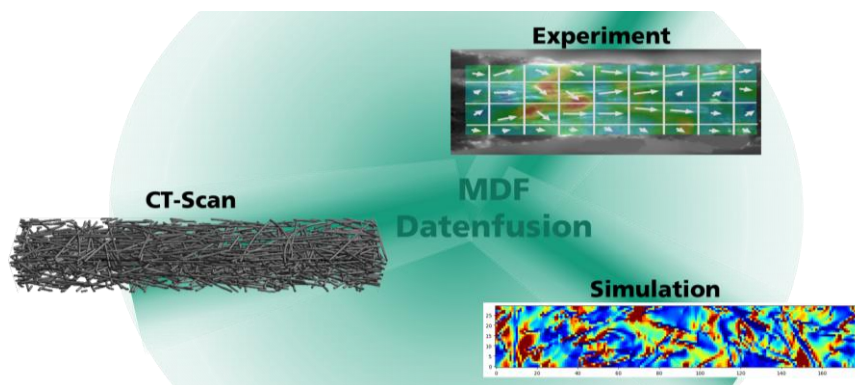


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Zusammenführung der Daten am Beispiel der Mikrozugprobe: dessen CT-Scan sowie die Simulation und das Experiment

1.5 Arbeitspaket 5: Digitalisierte Materialkarte

Ziel dieses Arbeitspaket war es eine Methodik zu entwickeln, um damit makroskopische Materialkarten automatisch Erzeugen zu können. Dies sollte mit durch das Training eines Neuronales Netz (oder ähnliches) geschehen. Für das Training musste eine genügend große Datenbasis geschaffen werden. Dazu musste dem NN Daten aus zwei Richtungen zur Verfügung gestellt werden (siehe Abbildung 19).

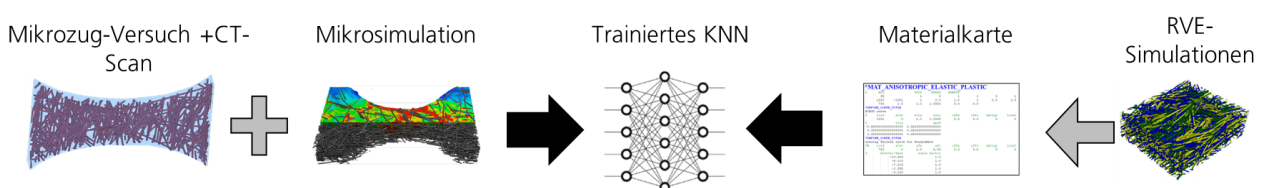


Abbildung 19: Konzept zur Datengrundlage für das Training eines Neuronales Netzes mit dem Ziel Materialkarten automatisiert zu Erzeugen

Zum einen wurden die Charakterisierungsversuche benötigt, wie sie dann auch in der Praxis an unbekanntem Werkstoffen durchgeführt werden können. In diesem Projekt wurde dies geliefert durch die Mikroversuche/-simulationen mit den CT-Scans (siehe Abbildung 20). Die lokalen Faserorientierungen und die Felder der Spannung und Dehnung wurden dafür räumlich in 3x9 aufgeteilt. Dadurch ergeben sich 27 Kurven, die mit ihrer zugrundeliegenden Faserorientierung genügend Informationen über das Materialverhalten liefern. Allerdings sind dieser Kurven noch „ungeordnet“ in dem Sinne, dass die Faserorientierungen stochastisch erzeugt wurden. Diese Methodik wurde entwickelt.

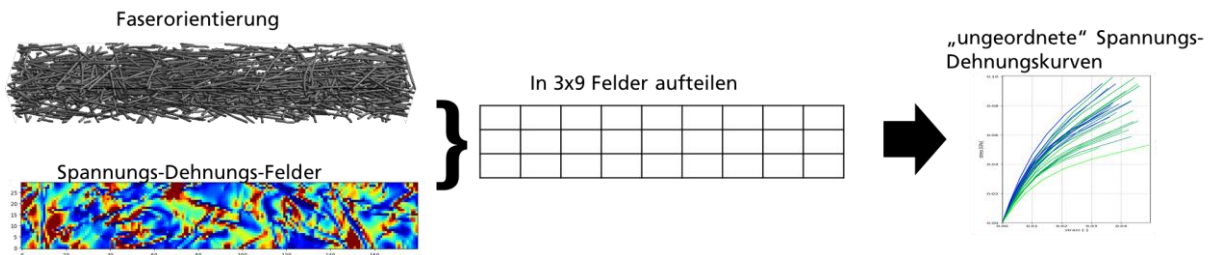


Abbildung 20: Konzept zum Datenhandling aus den experimentellen oder simulierten Mikrozugversuchen.

Auf der anderen Seite musste dem NN zum Training das gewünschte Ergebnis geliefert werden in der Form eines angepassten makroskopischen Modells bzw. der optimierten Parameter. Da eine experimentelle Charakterisierung einer Vielzahl von Materialien zu aufwendig ist, wurden RVE-Simulationen durchgeführt und die Ergebnisse anhand der Bauteile validiert (siehe Abbildung 21). Die RVEs können sehr gezielt bei bestimmten Orientierungsgraden, Fasergehaltes und Belastungen erzeugt und getestet werden. So lassen sich geordnete Spannungs-Dehnungskurven erzeugen. Durch die klar definierten Randbedingungen konnte mit einfachen Umrechnungsformeln ein automatisiertes Skript die erforderlichen Materialparameter bestimmen und so die makroskopische Materialkarte erzeugen. Auch diese Methode wurde entwickelt. So wurden viele RVE-Simulationen durchgeführt und die Materialkarten für mehrere Materialien zur Validierung bereitgestellt.

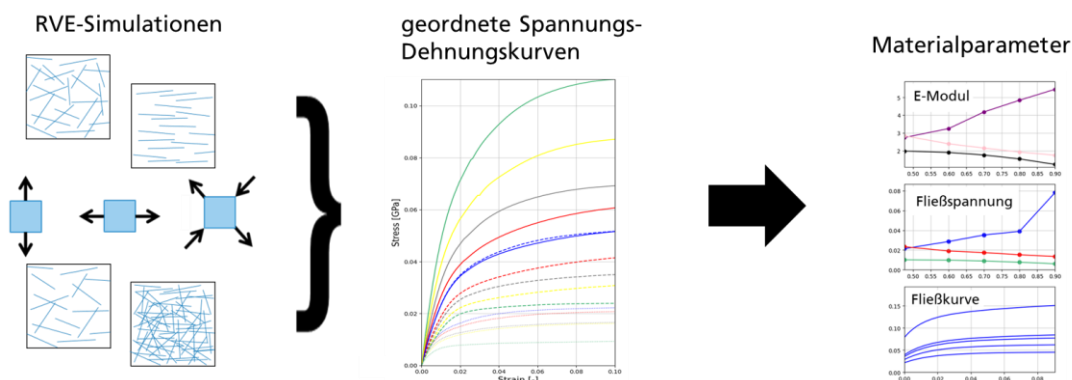


Abbildung 21: Konzept zum Datenhandling aus den experimentellen oder simulierten Mikrozugversuchen.

Im Folgenden soll die Methodik zur automatisierten Parametrisierung einer komplexen Materialkarte auf Basis lokaler Faserverteilungen erläutert werden. Ziel war die Erzeugung einer makroskopischen Materialkarte für den rezyklierten Werkstoff, die für makroskopische Crashsimulationen, z. B. mit dem Materialmodell *MAT_157 (*MAT_ANISOTROPIC_ELASTIC_PLASTIC) in LS-DYNA, eingesetzt werden kann. Das Modell basiert auf transversal isotropem linear-elastischem Verhalten. Die Fließbedingung erfolgt auf Grundlage des anisotropen Hill-Kriteriums; die Fließkurve kann nur unabhängig von der Belastungsrichtung definiert werden.

Die erforderlichen Materialparameter – insbesondere für das elastische Verhalten, den Fließbeginn sowie den Verlauf der Fließkurve – wurden aus den zuvor in AP3 durchgeführten virtuellen RVE-Simulationen abgeleitet. Für den Praxiseinsatz ist es nicht unbedingt erforderlich, für jede mögliche Kombination von Einflussgrößen eine Simulation durchzuführen. Stattdessen wurde eine Methodik entwickelt, um durch geeignete Annahmen und Interpolationen die Materialeigenschaften auch für nicht direkt simulierte Konfigurationen abzuschätzen. Neben der Kurvenanpassung für Spannungs-Dehnungs-Daten wurden daher Interpolationsstrategien zur Abdeckung eines breiten Parameterraums angewendet.

Die Spannungs-Dehnungs-Antwort des Werkstoffs PP-GF30 zeigt bereits ab kleinen Dehnungen ein leicht nichtlineares Verhalten und keinen klar abgegrenzten Fließbeginn, was die Ermittlung des Elastizitätsmoduls (E) erschwert. Der Fließbeginn wurde daher über den Punkt maximaler Krümmung (d. h. der stärksten Steigungsänderung) identifiziert. Die Steifigkeit wurde als mittlere Steigung bis zu diesem Punkt bestimmt (siehe Abbildung 22).

Für die elastischen Eigenschaften kamen etablierte analytische Homogenisierungsansätze zum Einsatz. Genutzt wurde ein transversalisotroper Steifigkeitstensor nach Mori und Tanaka (1973) für ellipsoidal geformte, unidirektional ausgerichtete Fasern. Dabei erfolgte eine Gewichtung der Faserorientierungen gemäß dem Ansatz von Advani und Tucker (1987). Mit dieser Methode konnten elastische Materialparameter für unterschiedliche Belastungsrichtungen, Faserorientierungen und Fasergehalte zuverlässig berechnet werden.

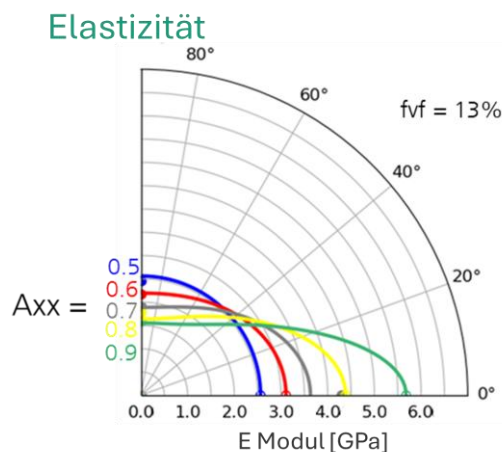


Abbildung 22: Die anisotrope Elastizität wurde automatisiert bestimmt aus den RVE Simulationen mit variierenden Faserorientierungsverteilungen und Belastungsrichtungen hier exemplarisch bei einem Faseranteil von 13%.

Basierend auf dem so bestimmten Elastizitätsmodul wurde für jede virtuelle Simulation die 0,2%-Dehngrenze ($R_{p0,2}$) ermittelt – definiert als der Punkt, an dem die Spannungs-Dehnungs-Kurve um 0,2 % von der Linearität abweicht (siehe Abbildung 23). Durch Subtraktion des elastischen Anteils von der Gesamtdehnung wurden daraus die plastischen Fließkurven gewonnen. Repräsentative Fließkurven wurden für Belastungen in 0°-, 90°- und Schubrichtung jeweils in Abhängigkeit der dominanten Faserorientierung (A_{xx}) ermittelt (siehe Abbildung 24). Für Fälle ohne direkte Simulationsergebnisse wurde eine lineare Interpolationsmethode entwickelt, um das plastische Materialverhalten zu approximieren. Aufgrund der hohen Rechenkosten und begrenzten Verlässlichkeit nichtlinearer analytischer Homogenisierungsansätze wurde bewusst auf diese verzichtet.

Durch diese Methodik zur automatisierten Parameteridentifikation konnte eine detaillierte, richtungsabhängige makroskopische Materialkarte effizient erstellt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den virtuellen Versuchen ließen sich mit geringem manuellem Aufwand in die numerischen Materialmodelle übertragen.

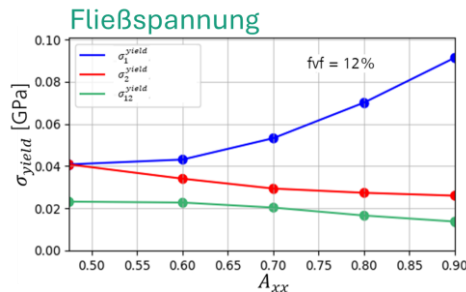


Abbildung 23: Die anisotrope Fließspannung wurde automatisiert bestimmt aus den RVE Simulationen mit variierenden Faserorientierungsverteilungen und Belastungen hier exemplarisch bei einem Faseranteil von 12%.

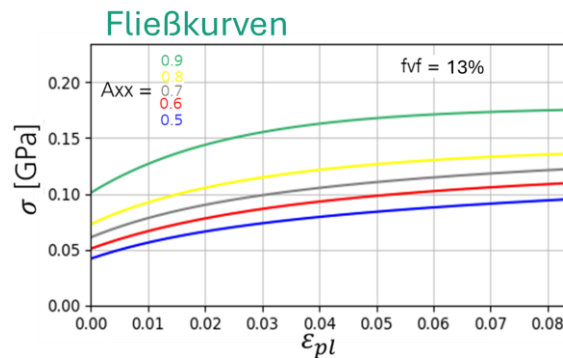


Abbildung 24: Die Fließkurven wurde automatisiert bestimmt aus den RVE Simulationen mit variierenden Faserorientierungsverteilungen und gemittelt über verschiedene Belastungen hier exemplarisch bei einem Faseranteil von 13%.

Nachdem so die Datenbasis „von beiden Seiten“ für das NN bereitgestellt wurden, konnte eine geeignete KI-Methode entwickelt werden, um auf Basis von Mikrozugversuchen komplexe makroskopische Materialkarten vorherzusagen. Im Folgenden soll diese Methodik erläutert werden.

Die Daten aus einem Mikrozugversuch bestehen anfangs, wie oben besprochen, aus 27 Spannungs-Dehnungskurven und den dazugehörigen lokalen Faserorientierungen. Die Punkte der Kurven liegen bei unterschiedlichen Dehnungen. Zusätzlich bestehen die Kurven aus vielen Punkten. Daher werden die Kurven zunächst mit ja 4 Parametern gefittet an die Funktion:

$$\sigma = a_1 * (1 - e^{-b_1 \epsilon}) + a_2 * (1 - e^{-b_2 \epsilon})$$

Mit derselben Funktion werden auch die „Ziel“-Spannungs-Dehnungs-Kurven gefittet, die durch die RVE-Simulationen generiert wurden. Eine mögliche Methode wäre nun eine KI zu trainieren, die die Parameter der Mikrozugversuche auf die Parameter der RVE-Simulationen überträgt. Dies ermöglicht der KI eine große Freiheit. Alle Spannungs-Dehnungskurven sind voneinander unabhängig. Mit einer sehr großen Datenmenge wäre die sicher möglich. Doch hier wurde sich entschieden Beschränkungen einzuführen, genauer, dass bei steigender Faserorientierung die maximale Spannung steigen muss.

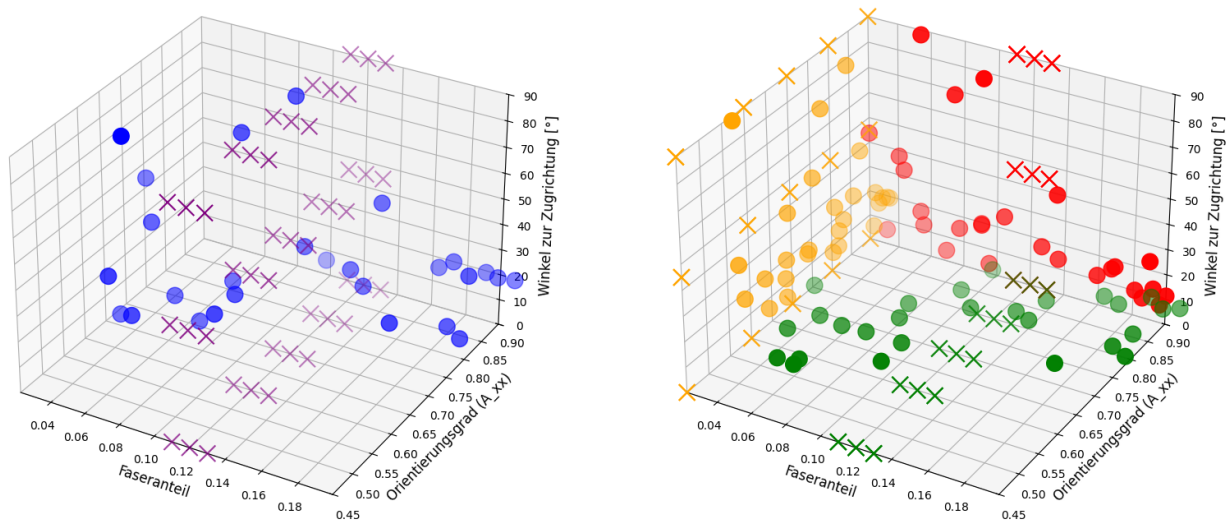
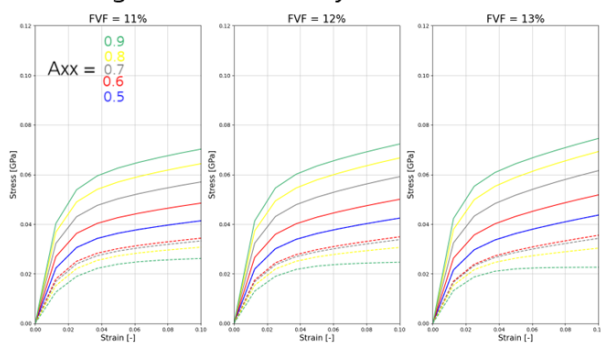


Abbildung 25: Darstellung der zufälligen Faserverteilung in den 27 Boxen des Mikrozugversuchs (Punkte) im Vergleich zu den gewählten Faserverteilungen der RVE Simulationen (Kreuze). Die Datenpunkte liegen im 3D-Raum der aufgespannt wird vom prozentuellen Faseranteil, dem ersten Eintrag des diagonalisierten FOTs A_{xx} und dem Winkel von diesem zur Zugrichtung. Links: die Punkte im Datenraum; Rechts: die Projektionen der Punkte auf Flächen des Diagramms.

Nun kann zunächst auf den Daten der Mikrozugversuche, die ungeordnet im FOT-Raum liegen (siehe Abbildung 25), eine einfache Interpolation durchgeführt werden auf die regelmäßigen FOT-Punkte, auf denen auch die RVE-Simulationen liegen. Die Interpolation wird mit einem Polynomfit im FOT-Raum für jeden der Fitparameter a_1, a_2, b_1, b_2 durchgeführt, wobei die genannte Beschränkung gelten. Somit erhalten wir „geordnete“ Spannungs-Dehnungskurven direkt aus Mikrozugversuchen, die für die gleichen Belastungen und Faserorientierung stehen wie die RVE-Simulationen. Doch die interpolierten Kurven entsprechen nicht den „wahren“ RVE-Simulationen (siehe Abbildung 26).

Vorhersage – einfacher Polynom-fit aus Mikrozug



Ziel-Verhalten aus den RVE Simulationen

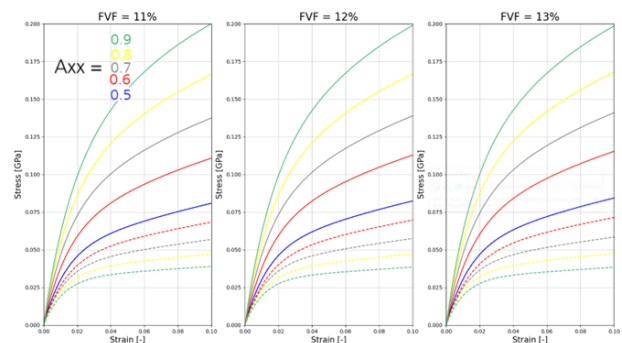


Abbildung 26: Vergleich des vorhergesagten Materialverhaltens auf Basis eines Mikrozugversuchs mittels Polynom-fit und Interpolation (links) und dem als wahr angenommenen Verhalten auf Basis der RVE Simulationen (rechts) exemplarisch für das virgin Material. Farblich dargestellt sind die Faserorientierungen für Zug in Faserrichtung (durchgezogene Linie) und Zug senkrecht dazu (gestrichelte Linie).

Hierbei muss man beachten, was genau verglichen wird. Die 27 Boxen, in die der Mikrozugversuch eingeteilt wurde, sind um ein Vielfaches kleiner als die RVE-Simulationen. Daher kann man nicht erwarten, dass diese Spannungs-Dehnungskurven dem realen Materialverhalten entsprechen. Zusätzlich werden die 27 Boxen im

Mikrozugversuch auch im Verbund belastet und benachbarte Boxen beeinflussen sich gegenseitig. Dies führt auch zu einem gemittelten Verhalten der Spannungen und Dehnungen. Die Daten sind aber dennoch nicht unbrauchbar, denn sie tragen einiges des realen Materialverhaltens in sich. Sie müssen nur in intelligenter Art und Weise skaliert und modelliert werden, sodass aus ihnen die Spannungs-Dehnungs-Kurven der RVE-Simulationen vorhergesagt werden kann.

Diese Skalierung der interpolierten Kurven ist nun der letzte Schritt der KI-Methode. Es wird eine genügend große Genauigkeit erreicht, wenn man jeden der vier Fitparameter a_1, a_2, b_1, b_2 jeweils für drei Stützpunkte skaliert (Zug 0° $A_{xx} = 0.9$, $A_{xx} = 45$, Zug 90° $A_{xx} = 0.9$; je bei FVF = 12%). Die Skalierung der anderen Spannungs-Dehnungskurven können dann linear interpoliert werden. Die KI muss nun nur noch $3 \times 4 = 12$ Werte vorhersagen auf Basis der Mikrozugversuche, um ein vollständiges Materialmodell zu kalibrieren. Dies ist eine sehr viel machbarere Aufgabe, als die kompletten Spannungs-Dehnungs-Kurven der RVE-Simulationen in alle ihren Freiheiten vorherzusagen.

Eine Beispielerarchitektur für ein Neuronales Netz, das diese Aufgabe erledigen kann, ist folgendes: Die Daten des Mikrozugversuchs würden als 2D-Bild interpretiert werden, mit 27 Bildpunkten und elf Features auf diesen Punkten (4 Fitparameter + 6 unabhängigen Einträge des FOTs + dem Faservolumengehalt = 11). Diese würden zuerst durch 2D-Convolutional-Layer gehen. So kann jede Box mit den selben Netz-Parametern verarbeitet werden. Dieser Teil des NN dient als Encoder. Im Mittelteil wird ein Selbst-Aufmerksamkeits-Algorithmus angewendet, entsprechend den modernen Transformern. Dies bietet die Möglichkeit, dass alle Daten miteinander in Zusammenhang gesetzt werden und ein Gesamtzusammenhang entsteht. Die Übertragung auf die 12 Output-Werte kann durch Fully-Connected-Layer geschehen und stellt den Decoder dar. Mit einer solchen Architektur können die Daten zufriedenstellend trainiert und wiedergegeben werden (siehe Abbildung 27). Doch für ein robustes Training ohne Overfitting ist die Datenmenge zu gering. Ein Transfer auf fremde Materialien kann bisher noch nicht erfolgen. Dafür muss daher der etwas zeitintensivere Weg über die Simulation von RVEs erfolgen.

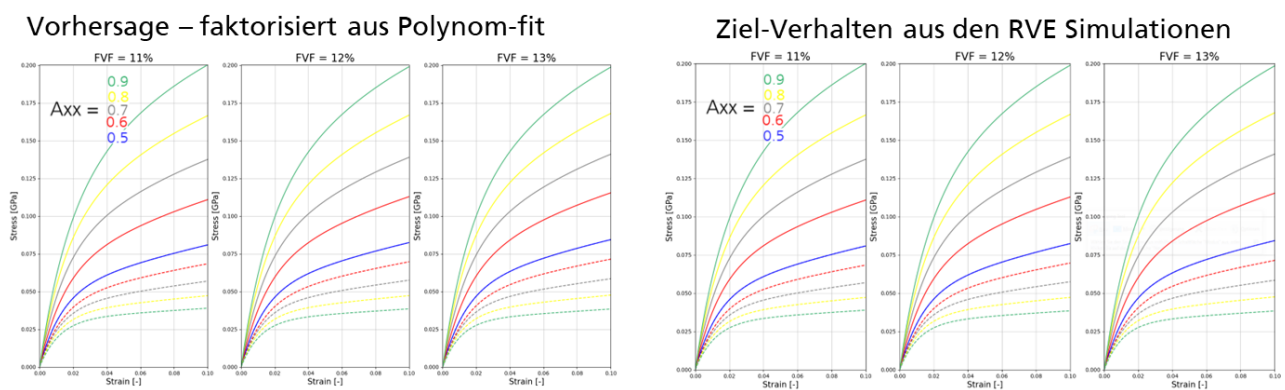


Abbildung 27: Vergleich des vorhergesagten Materialverhaltens auf Basis eines Mikrozugversuchs mittels KI vorhergesagtem faktorisiertem Polynom-fit (links) und dem als wahr angenommenen Verhalten auf Basis der RVE Simulationen (rechts) exemplarisch für das virgin Material. Farblich dargestellt sind die Faserorientierungen für Zug in Faserrichtung (durchgezogene Linie) und Zug senkrecht dazu (gestrichelte Linie).

1.6 Arbeitspaket 6: Adaption von Materialkarten

Zur Validierung der entwickelten Methodik wurden die automatisch generierten Materialkarten, welche ausschließlich auf RVE-Simulationen mit dem mikroskopischen Modell basieren, zunächst anhand von Zugversuchen der betrachteten Werkstoffe überprüft. Die Ergebnisse der Simulationen wurden mit den experimentellen Daten verglichen. Dabei zeigte sich für die Materialien eine sehr gute Übereinstimmung im elastischen Bereich bis zur Streckgrenze. Nach Erreichen der Streckgrenze lagen die simulierten Spannungen über den experimentell ermittelten Werten. Besonders ausgeprägt war diese Abweichung beim Rezyklat. Als Ursache hierfür ist das Schadens- und Versagensverhalten des Materials zu sehen, welches in den RVE-Simulationen nicht abgebildet wird. Daher wurde ein makroskopisches Versagensmodell auf Basis der experimentellen Zugversuche charakterisiert und in die Simulation integriert. Die Kombination des Deformations- und Versagensmodell kann das Verhalten der Materialien sehr gut vorhersagen (siehe Abbildung 28).

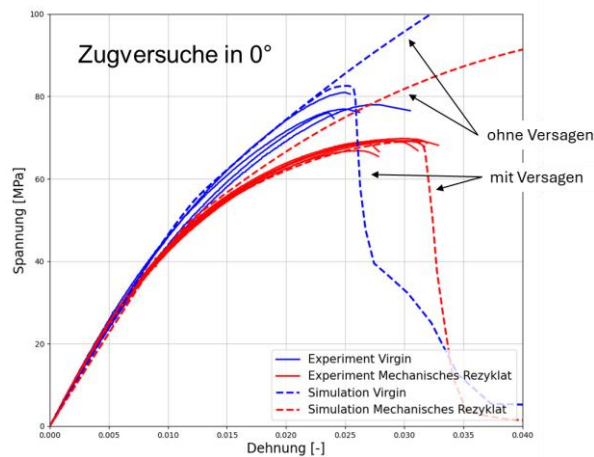


Abbildung 28: Spannungs-Dehnungskurven der experimentellen Zugversuche in Vergleich zu den Simulierten Ergebnissen mit und ohne Versagensmodell

In einem weiteren Schritt wurde die Validierung auf die Bauteilebene ausgeweitet. Die hierzu durchgeführten Simulationen basierten auf vorhergehenden Formfüllsimulationen, welche die lokale Faserorientierung im Bauteil lieferten. Diese wurden mit der hauseigenen Software FLUID des Fraunhofer ITWM gerechnet (Fraunhofer ITWM 2025c). Der Hauptunterschied zwischen dem virgin Material und dem mechanischen Rezyklat besteht für die Formfüllsimulation in der Faserlänge. In Abbildung 29 ist dargestellt, dass dies kaum Unterschiede in der Orientierung der Fasern auf Bauteilebene bewirkt, aber leichte Veränderungen in der Konzentration der Fasern. Diese Ergebnisse konnten schließlich auf das FE-Netz der Crash-Simulation übertragen werden (siehe Abbildung 30).

•

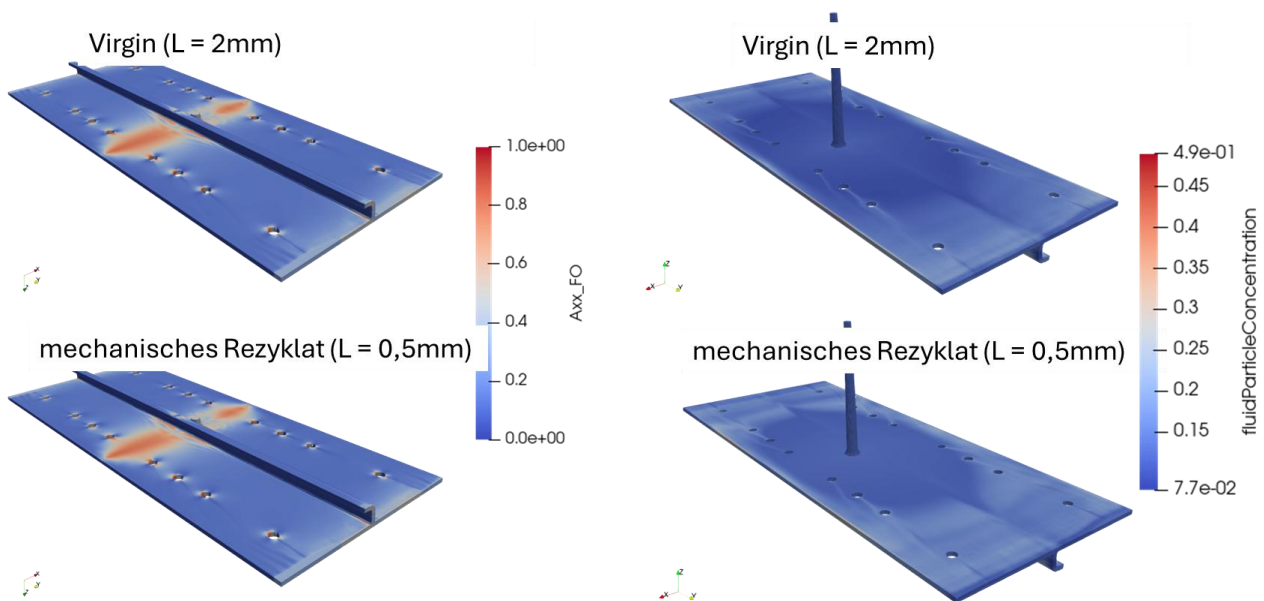


Abbildung 29: Die Verteilung der Faserorientierung (links) und der Faserkonzentration (rechts) im Bauteil laut der Formfüllsimulation für das virgin Material (oben) und das mechanische Rezyklat (unten)

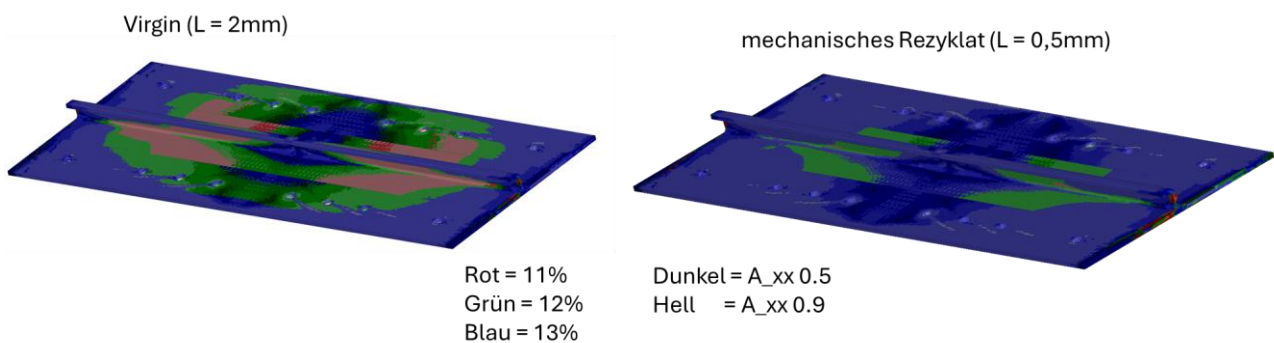


Abbildung 30: Die Übertragung der Faserorientierung und der Faserkonzentration im Bauteil auf das Crash-Netz für das virgin Material (links) und das mechanische Rezyklat (rechts)

Der Vergleich zwischen Simulation und Experiment zeigte eine sehr gute Übereinstimmung hinsichtlich der globalen Verformung und des Versagensverhaltens. Lediglich die Steigung im linearen Lastbereich war in den Simulationen geringfügig zu niedrig. Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Reibungseffekte im Experiment zurückzuführen, welche in der Simulation modelliert wurden, aber nicht explizit angepasst wurden (siehe Abbildung 31).

Die Ergebnisse belegen die erfolgreiche Umsetzung der skalenübergreifenden Methodik. Damit konnte gezeigt werden, dass auf Basis virtueller Mikrostrukturmodelle komplexe, nichtlineare Materialmodelle für faserverstärkte Kunststoffe – sowohl im Neu- als auch im Rezyklat-Zustand – automatisiert erstellt und realitätsnah eingesetzt werden können.

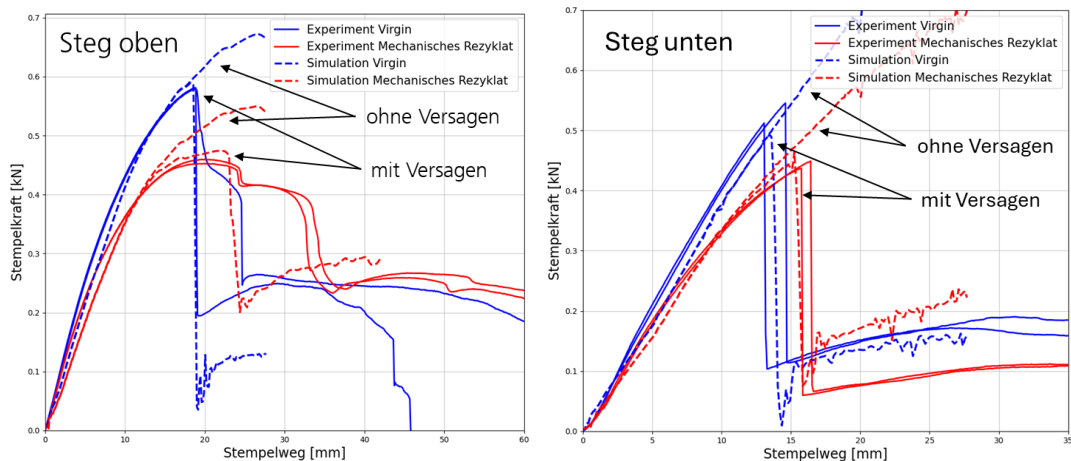


Abbildung 31: Die experimentellen Spannungs-Dehnungskurven des 4-Punkt-Biege-Versuchs im Vergleich mit den simulierten Ergebnissen. links) Steg oben. rechts) Steg unten.

1.7 Arbeitspaket 7: Ressourceneffektivität

Es wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Recyclingstrategien auf die Umweltbilanz und die mechanische Leistungsfähigkeit auswirken, wenn die Bauteilfunktion explizit berücksichtigt wird.

Auf Basis der mechanischen Charakterisierung wird eine performance-adjustierte Ökobilanz (LCA) aufgestellt. Systemgrenzen sind cradle-to-grave für Primärmaterial und cradle-to-cradle für Recycling, der Datensatz folgt dem Cut-off-Ansatz. Betrachtet werden das Treibhauspotenzial (GWP), der Verbrauch nicht-erneuerbarer Energie und die Kategorie Ecosystem Quality (ReCiPe). Für das Referenzsystem (Primärmaterial) entfallen etwa 72 % des GWP auf Spritzguss, Nachbearbeitung und Nutzungsphase, die alle maßabhängig sind, aber pro Prozessvariante identisch bleiben. Nur die verbleibenden rund 28 % – Materialherstellung und End-of-Life-Behandlung – sind durch die Wahl der Recyclingstrategie unmittelbar beeinflussbar und definieren damit das theoretische maximal erreichbare Reduktionspotenzial.

Ohne Anpassung der Bauteilgeometrie führt der Ersatz von 50 % Primär-PP durch PCR zu moderaten Einsparungen: Das GWP sinkt um 5,9 %, der Verbrauch nicht-erneuerbarer Energie um 15,2 % und die Beeinträchtigung der Ökosystemqualität um 2,9 %. Werden zusätzlich die vermiedene Müllverbrennung des ursprünglichen PCR-Abfalls und die damit entfallenden Emissionen berücksichtigt, steigen die GWP-Einsparungen – abhängig von der angenommenen Strombereitstellung – auf bis zu etwa 13,1 %, bleiben aber deutlich unter dem theoretischen Maximum von 28 %. Mechanisches Recycling nutzt dieses Potenzial wesentlich besser: Bei unveränderter Geometrie werden das GWP um 23,2 % (bis 25,7 % mit PV-Annahme), die nicht-erneuerbare Energie um 21,2 % und die Ökosystembelastung um 21,3 % reduziert.

Werden Leistungsabfälle durch mechanische Degradation funktionsgerecht berücksichtigt, schrumpfen diese Vorteile. Für steifigkeitsgetriebene Auslegungen wird die Bauteildicke so erhöht, dass der ursprüngliche Elastizitätsmodul kompensiert wird; dadurch steigt die Masse, und die Einsparungen des mechanischen Recyclings sinken auf etwa 20,4 % GWP-Reduktion. Kritischer ist der Fall crash- bzw. energieabsorptionsgetriebener Designs: Um gleiche Energieaufnahme zu erreichen, ist eine Massenzunahme von 18,4 % erforderlich, wodurch die GWP-Reduktion auf nur noch rund 9 % und die Einsparungen in den anderen Kategorien auf unter 10 % zurückgehen.

Die Untersuchungen wurden in openLCA und teilweise in dem von greenable entwickelten Tool durchgeführt. Die Ergebnisse in openLCA und Greenable zeigen eine hohe Übereinstimmung. Es zeigt sich, dass greenable eine verlässliche und benutzerfreundliche Berechnung der CO₂-Äquivalente in einer Cradle-to-Gate-Betrachtung ermöglicht.

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass mechanisches Recycling bei gleicher Geometrie klar größere Umweltentlastungen ermöglicht als der Einsatz von PCR, dass aber die Vernachlässigung der leistungsbedingten Massenzunahme die Umweltvorteile recycelter faserverstärkter Thermoplaste systematisch überschätzt. Ein performance-adjustiertes LCA-Vorgehen, das Mikrostruktur, Mechanik und funktionale Anforderungen koppelt, ist daher unerlässlich, um Recyclingstrategien für strukturelle Polymerbauteile realistisch zu bewerten.

2 Verwendung der Zuwendung

IWM:

- Wissenschaftlich-technisches Personal: Von den bewilligten 22 Personenmonaten der HPA Gr. A wurden 22,93 Personenmonate abgerufen. Von den bewilligten 4 Personenmonaten der HPA Gr. B wurden 0,51 Personenmonate abgerufen.
- Geräte: Wie im Einzelfinanzierungsplan des Antrags aufgeführt, wurden keine Geräte beschafft.
- Leistungen Dritter: Wie im Einzelfinanzierungsplan des Antrags aufgeführt, wurden keine Leistungen Dritter beschafft.

ITWM:

- Wissenschaftlich-technisches Personal: Von den bewilligten 21,5 Personenmonaten der HPA Gr. A wurden 21,64 Personenmonate abgerufen. Von den bewilligten 3 Personenmonaten der HPA Gr. B wurden 2,58 Personenmonate abgerufen.
- Geräte: Wie im Einzelfinanzierungsplan des Antrags aufgeführt, wurden keine Geräte beschafft.
- Leistungen Dritter: Wie im Einzelfinanzierungsplan des Antrags aufgeführt, wurden keine Leistungen Dritter beschafft.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die für das Forschungsprojekt geleisteten Arbeiten waren angemessen und zur Erreichung des Forschungszieles notwendig.

4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Einfache Materialmodelle für komplexe faserverstärkte Spritzgusswerkstoffe, parametrisiert auf Basis weniger Charakterisierungsversuche, werden häufig gegenüber den komplexen Modellen bevorzugt. Die Kosten stehen hierbei im Vordergrund, obwohl die einfachen Modelle weder die Dehnratenabhängigkeit, die Mehrachsigkeit oder den Einfluss der Faserorientierungsverteilung berücksichtigen und damit reale Schädigungen selten, höchstens zufällig, prognostizieren können. Werden nun weitere Kosten durch Rezyklate gespart,

ohne dass die Materialkarten angepasst werden, ist die Auslegung sicherheitsrelevanter Bauteile mit einer hohen Unsicherheit behaftet.

In diesem Projekt wurde ein alternatives Vorgehen entwickelt, indem einzelne experimentelle Untersuchungen mit hoher Detailtiefe die Erzeugung einer Vielzahl an virtuellen Daten für die Parametrisierung von komplexen Materialmodellen ermöglichen. Der Workflow nach den Experimenten wird unter Zuhilfenahme eines Digitalen Zwillings automatisiert. Diese Methodik steht am Ende des Projektes dem industriellen Einsatz zur Verfügung und kann auf viele verschiedene Werkstoffe angewendet werden. Unternehmen ist es möglich mit deutlich geringerem Aufwand zu Materialkarten mit hoher Prognosegüte zu kommen. Somit kann den Unsicherheiten beim Einsatz von Rezyklaten entgegnet und die Qualität von Bauteilen gewährleistet werden. Der Bedarf hierfür zeigt sich an der großen Teilnehmerzahl des projektbegleitenden Ausschusses. Fast die Hälfte dieser Unternehmen sind KMUs, denen es vor allem darum geht ein einheitliches Vorgehen beim Einsatz und der Bewertung von Rezyklaten zu entwickeln. Durch die entwickelte Methodik ist der Einsatz von Rezyklaten mit deutlich weniger Risiko behaftet und für kleinere Unternehmen kalkulierbarer.

Die Konzepte der CO₂ Bilanzierung und der schnellen digitalen Materialkartenerstellung können auf andere (Verbund)-Werkstoffe übertragen werden, insbesondere auf den immer mehr an Bedeutung gewinnenden 3D-Druck. Da gerade im 3D-Druck, durch spezifische Druckstrategien, die Faserverteilungen und -orientierung sehr unterschiedlich sein können, ist die variable digitale Materialkartenerstellung für KMU sehr interessant. Viele KMU setzen sich mittlerweile mit diesen Technologien auseinander, nicht nur für die Kostenminimierung im Prototypenbau. Die Berechenbarkeit bzw. adäquate Bauteilsimulation für additive Prozesse steckt aber weitestgehend noch in den Kinderschuhen, obwohl der Bedarf durch die Industrialisierung der Prozesse stark ansteigen dürfte.

Mit den im Projekt gewonnenen Erkenntnissen kann abgeschätzt werden, wieviel Rezyklatanteil einem Ausgangswerkstoff, ohne genaue Kenntnis über die durchlaufenen Zyklen, beigemischt werden kann und dabei die Bauteilqualität zu gewährleisten. Dies kann in Abstimmung mit der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) in eine FAT-Richtlinie für den Umgang mit Rezyklaten münden. Diese schafft einen breiten Konsens für die Branche, dient darüber hinaus als Orientierung und hilft vor allem kleineren Unternehmen bei den Herausforderungen im Zusammenhang mit der Verwendung von Rezyklaten.

Die im Projekt und unter Beteiligung der PA-Mitglieder durchgeführte Lebenszyklusanalyse (LCA) zeigt den Weg auf, wie CO₂-Bilanzen für Rezyklate mit relativ geringem Aufwand erstellt werden können. Da in Zukunft für Unternehmen Recyclingkonzepte und deren Bewertung unausweichlich sein dürfte, kann das Projekt und die geplanten Transfermaßnahmen und Folgeforschungen für weitere Prozesse und Werkstoffe einen wertvollen Beitrag leisten. Im Rahmen der PA-Sitzungen wurde Industrievertretern das Vorgehen bei der Bewertung und Modellierung von rezyklierten Bauteilen und die Umsetzung von Lebenszyklusanalysen für Rezyklate erläutert.

5 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Zum Wissenstransfer in die Wirtschaft fand halbjährlich ein Treffen des projektbegleitenden Ausschusses statt. Diese Sitzungen dienten der Beratung, der Vorstellung von Fortschrittsberichten sowie der Diskussion, Abstimmung und Festlegung weiterer Maßnahmen.

Daneben wurden die Projektergebnisse auf mehreren Konferenzen möglichen Anwendern und der wissenschaftlichen Community vorgestellt, darunter auf der 14th European LS-DYNA Conference 2023, dem asc(s) simpulse day 2024, der automotive CAE Grand Challenge Konferenz 2024 und der Verbund 2024.

Im Rahmen des Projekts wurden bisher zwei Veröffentlichungen geschrieben. 2024 erfolgte eine Veröffentlichung zur KI-gestützten Vorhersage der Faserorientierung im Spritzguss. 2026 erschien eine weitere Veröffentlichung zur Modellierung des Einflusses von mechanischem Recycling für faserverstärkte Kunststoffe, mit der die wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Einsatz von Rezyklaten erneut in die internationale Wissenschaftsgemeinde eingebracht wurden. Darüber hinaus ist eine Veröffentlichung zur Lebenszyklusanalyse (LCA) aktuell in Begutachtung. Die Veröffentlichung als Open Access stellt sicher, dass die Arbeiten allgemein zugänglich sind, insbesondere auch für KMU ohne entsprechende Abonnements.

Ein weiterer Baustein des Wissenstransfers ist die akademische Ausbildung: Am 5. Juni 2024 wurde die Bachelorarbeit von Jakob Jäckel an der TU Darmstadt mit dem Thema „Mehrskalige Modellierung des Versagens in faserverstärkten Kompositen“ abgeschlossen. Zudem wurde von Till Hermann eine Bachelorarbeit mit dem Titel „Analysing Neural Network Architectures for predicting Fibre Orientation Tensors“ an der Universität Freiburg im Rahmen des Projekts realisiert. Somit konnten nicht nur wissenschaftliche Kenntnisse aus dem Projekt vermittelt werden, sondern auch Nachwuchskräfte für die Wirtschaft ausgebildet werden.

Seit 2023 unterstützen eine Projektwebseite und Social-Media-Aktivitäten die Bekanntmachung des Projekts und seiner Ergebnisse. Abschließend werden nach Projektende Messdaten den Mitgliedern des Projektarbeitskreises (PA) zur Verfügung gestellt, sodass diese die Daten für eigene Zwecke und weitere Forschungsvorhaben nutzen können. Gerade KMUs haben oft keine umfangreiche Datenbasis und haben daher besonderen Nutzen von dieser Maßnahme.

Während zur Untersuchung der Zusammenhänge, wie sich Recycling auf die Mikrostruktur und die mechanischen Eigenschaften von faserverstärkten Kunststoffen auswirkt, umfangreiche und detaillierte Analysen durchgeführt wurden, können die Ergebnisse auch für eine einfache Abschätzung, wie sich die Verwendung von Rezyklat auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs auswirkt, verwendet werden. Für die Mikrostrukturcharakterisierung wurden CT-Scans zur Bestimmung der Faserorientierung, Veraschung zur Bestimmung der Faserlängenverteilung, und RVE-Rechnungen zur Abschätzung der Auswirkungen der mikrostrukturellen Änderungen eingesetzt. Die Ergebnisse erlauben einfachere Rückschlüsse, auch ohne aufwändige Analysen durchzuführen, was insbesondere für KMU von Nutzen ist. Beispielsweise kann für mechanisches Recycling geschlussfolgert werden:

- Die Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften kann hauptsächlich auf Faserverkürzung zurückgeführt werden.
- Der erste Rezyklierungsschritt hat die stärksten Auswirkungen. Die Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften durch weitere Rezyklierungsschritte ist geringer.
- Die Steifigkeit wird, zumindest für den Fall von langglasfaserverstärkten Thermoplasten, weniger stark reduziert als die Festigkeit des Werkstoffs.
- Auch die Zugabe von TiO_2 (z.B. zur Farbneutralisierung) kann zu einer deutlichen Reduzierung der Faserlängen führen.

Insbesondere ist es nicht notwendig, die im Projekt verwendeten Software-Tools zu lizenzieren und einzusetzen. Damit kann der Einsatz von Rezyklat für Faserverbundwerkstoffe in der Praxis deutlich vereinfacht

werden. Wenn ein Unternehmen jedoch entsprechende Simulationsmethoden einsetzen will, können durch das im Projekt entwickelte Vorgehen wertvolle Informationen virtuell gewonnen werden.

Die im Projekt kalibrierten Materialkarten für PP-GF30 können auch für andere Bauteile verwendet werden, wenn eine Vorhersage der Faserorientierung aus einer Spritzgussimulation vorliegt. Streng genommen nehmen sie allerdings eine konstante Faserlängenverteilung im Bauteil an, obwohl sich in der Realität die Faserlängenverteilung lokal und geometrieabhängig ändern kann (Wittemann et al. 2022).

Fachliche Anknüpfungspunkte mit einzelnen PA-Mitgliedern konnten identifiziert werden und werden in passenden Kooperationsvorhaben weiter vertieft.

6 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

6.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen (vom Projektstart bis zum Projektende)

Zeitraum	Maßnahme	Ziel/Bemerkung
halbjährlich	Treffen des projektbegleitenden Ausschusses	Beratung, Fortschrittsbericht, Diskussion, Abstimmung, Festlegungen, Maßnahmen
30. August 2023	Abschluss der B.Sc.-Arbeit von Till Herrmann an der Universität Freiburg	Thema: „Analysing Neural Network Architectures for predicting Fibre Orientation Tensors“
18. Oktober 2023	Vortrag auf der 14th European LS-DYNA Conference 2023	Vermittlung von neuen Kenntnissen und numerischen Methoden, Darstellung der Anwendung
14. März 2024	Vortrag auf dem asc(s) impulse day	Vermittlung von neuen Kenntnissen und numerischen Methoden, Darstellung der Anwendung
15. April 2024	Veröffentlichung zur KI-gestützten Vorhersage der Faserorientierung im Spritzguss (Link)	Methodentransfer in die internationale Wissenschaftsgemeinde
16.-17. April 2024	Vortrag auf der automotive CAE Grand Challenge	Ergebnistransfer über den PA hinaus
24. Mai 2024	Vortrag auf der Verbund 2024	Transfer der wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Einsatz von Rezyklaten in die internationale Wissenschaftsgemeinde
5. Juni 2024	Abschluss der B.Sc.-Arbeit von Jakob Jäckel an der TU Darmstadt	Thema: „Mehrskalige Modellierung des Versagens in faserverstärkten Kompositen“
Ab 2023	Projektwebseite (Link) und Social Media	Bekanntmachung des Projekts und der Ergebnisse

15. Februar 2026	Veröffentlichung zur Modellierung des Einflusses von mechanischem Recycling für FVK (Link)	Transfer der wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Einsatz von Rezyklaten in die internationale Wissenschaftsgemeinde
22. Mai 2026	Bereitstellung von Mess- und Simulationsdaten an PA-Mitglieder	PA-Mitglieder können die Daten für eigene Zwecke / Forschung verwenden

6.2 Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Abschlussbericht und Ergebnistransfer	Bereitstellung von Ergebnissen und numerischen Methoden für Anwendungen in der Wirtschaft	Veröffentlichung in der FAT-Schriftreihe	2026
Veröffentlichungen in Peer-Review Zeitschriften.	Wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse und Darstellung von Anwendungsbeispielen	Composites Part C: Open Access, Journal of Composite Materials	2026
Konferenzbeiträge	Vermittlung von neuen Kenntnissen und numerischen Methoden, Austausch mit internationalen Experten	Bei MATFEM Konferenz	2025
Schulungsangebote für LCA	Vermittlung von Kenntnissen und Fähigkeiten	IWM Freiburg/ITWM Kaiserslautern	2025
Forschungsanträge zur Übertragung der erarbeiteten Ergebnisse und Methoden auf andere Prozesse und Werkstoffe	Schnelle Simulation von FVK-Bauteilen unterschiedlicher Herstellungsprozesse; virtuelle Bewertung von Werkstoffen und Rezyklaten	IGF, ZIM, BMW, EU...	Ab 2026

7 Danksagung

Das IGF-Vorhaben 22745 N der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für diese Förderung sei gedankt.

Wir bedanken uns für die unterstützenden Sach- und Dienstleistungen sowie die interessanten Diskussionen und Anregungen aus dem projektbegleitenden Ausschuss, dessen Mitglieder im Folgenden aufgeführt sind:

- Benjamin Schneider, Armin Kech Robert Bosch GmbH
- Marian Bulla Altair Engineering
- Richard Einsporn zegla Plast Kunststoffspritzerei GmbH & Co. KG
- Markus Franzen, Dieter Langenfelder Lyondell-Basell
- Erik Glatt, Oliver Rimmel Math2Market GmbH
- André Haufe Dynamore, jetzt Synopsys
- Michael Heitzer Magma Gießereitechnologie GmbH
- Olaf Herd Celanese Engineered Materials
- Roland Peter Roof Systems Germany GmbH
- Martin Schwab 4a Engineering GmbH
- Gerhard Slik Trinseo Netherlands B. V.
- Jörg Sebastian, Kathrin Schwan SBKS
- Amit Wirnik palPlast
- Martin Tupy, Stefan Niedrig,
Martin Schlechtriemen,
Christian Schürger Brose
- Wolfgang Schlögl Autoliv
- Benedikt Schunicht, Kerstin Sturm Weißer & Gießhaber
- Wolfgang Korte, Markus Stojek Part Engineering
- Fatma Karayagiz, Andreas Lingner cirp GmbH
- Frank Helbig Olu-Preg Composite
- Laia Ramon-Villalonga Stellantis
- Michael Richter Matfem
- Patrick Kölsch greenable
- Markus Steeg ASH Automation Steeg & Hoffmeyer
- Markus Steffens Intellight
- Doris Reinel-Bitzer ZF Group
- Tony Porsch Volkswagen

Beteiligte Mitarbeiter der Forschungsstellen:

- IWM: Dr. Jörg Lienhard, Dr. Timo Schweiger, Dr. Alexander Jackstadt, Frank Huberth
- ITWM: Dr. Hannes Grimm-Strele, Dr. Dariusz Niedziela, Dr. Matthias Kabel, PD Dr. Heiko Andrä

8 Literaturverzeichnis

Andrä, Heiko; Dobrovolskij, Dascha; Schladitz, Katja; Staub, Sarah; Müller, Ralf (2019): Modelling of Geometrical Microstructures and Mechanical Behaviour of Constituents. In Stefan Diebels, Sergej Rjasanow (Eds.): *Multi-scale Simulation of Composite Materials*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Chen, Tianran; Mansfield, Craig D.; Ju, Lin; Baird, Donald G. (2020): The influence of mechanical recycling on the properties of thermotropic liquid crystalline polymer and long glass fiber reinforced polypropylene. In *Composites Part B: Engineering* 200, p. 108316. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108316.

Fliegenger, Sascha; Kennerknecht, Tobias; Kabel, Matthias (2017): Investigations into the damage mechanisms of glass fiber reinforced polypropylene based on micro specimens and precise models of their microstructure. In *Composites Part B: Engineering* 112, pp. 327–343. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.12.051.

Fraunhofer ITWM (2025a): FeelMath: Fraunhofer ITWM. Available online at <https://www.itwm.fraunhofer.de/feelmath-en>, checked on 7/8/2025.

Fraunhofer ITWM (2025b): FiberMath: Fraunhofer ITWM. Available online at <https://www.itwm.fraunhofer.de/fibermath-en>, checked on 7/8/2025.

Fraunhofer ITWM (2025c): FLUID: Fraunhofer ITWM. Available online at <https://www.itwm.fraunhofer.de/fluid>, checked on 7/8/2025.

Grimm-Strele, Hannes; Kabel, Matthias; Andrä, Heiko; Schweiger, Timo; Lienhard, Jörg (2022): Materialkarten für FVK-Werkstoffe auf Basis von realen und virtuellen Messungen. In *NAFEMS Magazin* (61), pp. 44–54. Available online at https://www.nafems.org/publications/resource_center/m_dach_61/.

Krier, Maxime; Wolters, Jan; Hopmann, Christian; Fritzen, Felix; Kabel, Matthias (2026): Efficient multiscale simulation approaches for lightweight compact and foamed fiber-reinforced components. In *Composite Structures* 385, p. 120163. DOI: 10.1016/j.compstruct.2026.120163.

Math2Market GmbH (2023): GeoDict. Version 2023: Math2Market GmbH. Available online at doi.org/10.30423/release.geodict2023, checked on 7/8/2025.

Wetzel, Paul; Schneider, Benjamin; Sambale, Anna Katharina; Stommel, Markus; Kaiser, Jan-Martin (2025): RVE Simulations of short fiber reinforced polyamide: Direct and inverse matrix parameter identification in view of the semi-crystalline polymer structure. In *Composites Science and Technology* 260, p. 110961. DOI: 10.1016/j.compscitech.2024.110961

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2021)

Nr.	Titel
340	Schnelle, breitbandige Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2021
341	Wasserstoffkompatibilität von Aluminium-Legierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge, 2021
342	Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030, 2021
343	Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process, 2021
344	Review of non-exhaust particle emissions from road vehicles, 2021
345	Ganzheitliche Betrachtung von Rollwiderstandsverlusten an einem schweren Sattelzug unter realen Umgebungsbedingungen, 2021
346	Studie zur Abschätzung der Anwendungspotentiale, Risiken und notwendigen Forschungsbedarfe bei der Verwendung von Glashohlkugeln in Kombination mit thermoplastischem Schaumspritzguss, 2021
347	Typgenehmigungsanforderungen an Level-3-Autobahnssysteme - Hintergrundbetrachtungen zu technischen Anforderungen für eine automatisierte Fahrfunktion, 2021
348	Einfluss der Kantenbearbeitung von Aluminiumblechen auf das Restumformvermögen sowie die Festigkeitseigenschaften unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung, 2021
349	Verstärkung dünner formgehärteter Bauteile mittels FVK-Verrippungen, 2021
350	HMI Anforderungen für den automatisierten Individualverkehr unter Berücksichtigung von Leistungsmöglichkeiten und -grenzen älterer Nutzer, 2021
351	Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2021
352	Entwicklung einer gewichtsoptimierten Batteriegehäusestruktur für Volumenfahrzeuge, 2021
353	Charakterisierung und Modellierung des Deformations- und Versagensverhaltens von nicht-faserverstärkten Thermoplasten unter mehrachsiger Crashbelastung, 2021
354	Untersuchung zum thermischen Komfort im Pkw für den Grenzbereich des Luftzugempfindens, 2021
355	Anforderungen an die Güte, Verfügbarkeit und Vorausschau einer Reibwertschätzung aus Funktionssicht, 2021
356	Entwicklung einer standardisierten Prüfanordnung zur Bewertung der Übernahmeleistung beim automatisierten Fahren, 2022
357	Vorstudie zu Verkehrsemissionen - Räumlich und zeitlich aufgelöste Daten durch Schwarmmessungen, 2022
358	Produktivitätssteigerung und Kostensenkung der laser-additiven Fertigung für den Automobilbau, 2022
359	Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen mit Fokus auf den Ventilationswiderstand von Nfz-Rädern, 2022
360	Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der thermischen Behandlungen beim Lackieren im Prozess bei hochfesten Werkstoffen, 2022

- 361 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2022
- 362 Ermüdung kurzfaserverstärkter thermoplastischer Polymerwerkstoffe, 2022
- 363 Market research and definition of procedure to comparison of comfort measuring systems for a vehicle cabin, 2022
- 364 Methodische Ansätze zur Auswahl von Bordnetzstrukturen mit erhöhten Zuverlässigkeitsanforderungen, 2022
- 365 Fahrwiderstand von Lenk- und Liftachsen in Kurven und auf gerader Strecke unter realen Umgebungsbedingungen, 2022
- 366 Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen, 2022
- 367 Experimentelle und numerische Untersuchung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen mit konstanten und variablen Amplituden und Entwicklung einer Bewertungsmethode, 2022
- 368 Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process – Part 2, 2023
- 369 Level 2 hands-off – Recommendations and guidance, 2023
- 370 Funktionale Sicherheitsbewertung und Cybersecurity Analysen relevanter Use Cases für die Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2023
- 371 Study on the technical evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal data in the automotive sector, 2023
- 372 Legal evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal and non-personal data in the automotive sector, 2023
- 373 Quantifizierung der mechanischen Belastbarkeit von Infrarot-Schweißverbindungen in zyklisch belasteten Thermoplast-Bauteilen, 2023
- 374 Lebensdauerbewertung von geschweißten Verbindungselementen unter Montagevorspannung, 2023
- 375 Einfluss verschiedener Scherschneidparameter auf die elektro-magnetischen Eigenschaften von NO-Elektroblech automobiler Traktionsantriebe, 2023
- 376 Automatisierte Demontage von Traktionsmotoren der E-Mobilität - Eine Studie zur Optimierung der Demontage, 2023
- 377 Untersuchungen zum Einfluss von feuchtem Wasserstoff auf die Spannungsrisskorrosionsempfindlichkeit von Aluminium-Legierungen für den Einsatz in Brennstoffzellenfahrzeugen, 2024
- 378 Diagnosekonzepte für zonale und teilredundante Bordnetzarchitekturen, 2024
- 379 Dynamische Erfassung und Beurteilung von Situationsbewusstsein im Kontext des automatisierten Fahrens, 2024
- 380 Charakterisierung zukunftssträchtiger Zellmaterialien im Hinblick auf deren Anforderungen an das Batteriepack, 2024
- 381 Fahrdynamik des Automatisierten Fahrens, 2024
- 382 Forschungsperspektiven für Mobilität in klimaneutralen Städten 2045 - Explorative Szenarioanalyse und innovationspolitische Handlungsempfehlungen, 2024
- 383 Codierung und Analyse der AO-Klassifikation für Fuß- und Sprunggelenksverletzungen zur Evaluation potentieller Langzeitfolgen, 2024
- 384 EMV-Nachweis der Störfestigkeit auf Komponenten- und Systemebene für FailOp ab Level 3 im Hinblick auf die Funktionssicherheit - Erster Projektteil, 2024

- 385 Retrospektive Berechnung des Crashpulses aus Fahrzeugdeformationen basierend auf EES-Berechnung von Fahrzeug-Voxelmodellen unter Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufes, 2024
- 386 Energieverluste infolge von Rad-/Achsfeststellungen am schweren Sattelzug bei realen Umgebungsbedingungen, 2025
- 387 Recycling von Permanentmagneten und Bewertung der Rezyklierbarkeit von Permanentmagnet-Synchronmotoren, 2025
- 388 Graphen- und heuristikbasierte Topologieoptimierung von 3D-Crash-Strukturen von Personenkraftwagen, 2025
- 389 Bewertung und Erhöhung des Potentials von Binder Jetting durch Nutzung kosteneffizienter Stahlpulver für den Einsatz in der Automobilindustrie, 2025
- 390 Driver performance models as reference for the quality of automated driving functions, 2025
- 391 Experimentelle und numerische Analyse des Fließverhaltens von hochviskosen Wärmeleitstoffen im Fertigungsprozess, 2025
- 392 Maßnahmen zum Aufbau und Erhalt von Situationsbewusstsein im Kontext des automatisierten Fahrens, 2025
- 393 Reduktion von Kupfer und Eisen in geschmolzenem Aluminium – modernes Aluminium aus alten Fahrzeugen, 2025
- 394 PCM-F³: PCM Fit For Future, 2025
- 395 Blech-Umformeinfluss mittels Machine Learning für Konzept-Crashsimulationen (UmMatCra-ML), 2025
- 396 Absicherung moderner Fahrzeug-Bordnetze mittels elektronischer Sicherungen (eFuses), 2025
- 397 Fahrdynamik des automatisierten Fahrens 2.0, 2025
- 398 Machbarkeitsstudie zur Koppelung von Methoden des maschinellen Lernens und CFD zur Vorhersage von Be- und Enttaugung an Fahrzeugscheiben, 2025
- 399 Charakterisierung der Radumströmung bei realer Reifendeformation, 2026
- 400 Reduzierung von Kaltaufschweißungen durch gezielte Anpassung des Seebeck-Koeffizienten von Werkzeugwerkstoffen mittels Laserauftragschweißen, 2026
- 401 Variable Digitalisierung von Materialkarten für FVK und ihre Rezyklate, 2026

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.fat-ev.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2026

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de
Twitter @VDA_online

VDA | Verband der
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de/fat

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik