

Abschlussbericht DuroHyb

Vorhabenbezeichnung: DuroHyb – Methoden- und Technologieentwicklung zur Konzeption, Konstruktion, Herstellung und Prüfung von langzeitbetriebssicheren Metall-Duroplast-Verbunden in höchst beanspruchten Bauteilen.	
Zuwendungsempfänger: Bakelite GmbH Gennaer Str. 2-4 58642 Iserlohn	Förderkennzeichen 03XP0268D
Projektleiter*in Jens Gennath	Berichtszeitraum 01.03.2020 – 28.02.2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Abschlussbericht DuroHyb

Inhalt

Inhalt	2
1 Teil I - Kurzbericht.....	4
1.1 Aufgabenstellung	4
1.2 Ablauf des Vorhabens	4
1.3 Wesentliche Ergebnisse	4
2 Teil II - Eingehende Darstellung.....	5
2.1 AP0: Projektbegleitende Maßnahmen	5
2.2 AP1: Projektierung	5
2.3 AP2: Materialauswahl und Probekörperherstellung	5
2.3.1 Adhäsionsuntersuchungen	5
2.3.2 Entwicklung eines chemischen Haftvermittlers als mögliche Alternative zur chemischen Oberflächenstrukturierung.....	7
2.4 Identifizierung optimaler Temperbedingungen zur Maximierung der nachvernetzungsbedingten Schwindung.	13
2.4.1 Erstellung eines Kinetikmodells der Härtung	17
2.4.2 Beschreibung der Prozessschwindung.....	18
2.4.3 Methodenentwicklung zur Bestimmung der Dauerfestigkeit per DMA.....	21
2.5 AP8: Recycling.....	23
2.6 Zusammenfassung.....	29
2.7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	30
2.8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	30
2.9 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses	30
2.10 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen.	30
Nicht bekannt.	30
2.11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse nach Nr. 5 der NABF und NKBF.....	31
3 Teil III - Erfolgskontrollbericht Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen	32
3.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen	32
3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen.....	32

Abschlussbericht DuroHyb

3.3	Fortschreibung des Verwertungsplans.	32
3.3.1	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte	32
3.3.2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	32
3.3.3	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende .	32
3.3.4	Tabellarische Zusammenfassung.....	33
3.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse	33
3.5	Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben	33
3.6	Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und der Zeitplanung. Abweichungen sind kurz zu begründen (bspw. bei vermindertem Mittelabruf).	33

Abschlussbericht DuroHyb

1 Teil I - Kurzbericht

1.1 Aufgabenstellung

Die Gesamtzielsetzung des Vorhabens war die ganzheitliche Entwicklung eines Kunststoff-Metall Hybridbauteils innerhalb einer geschlossenen Wertschöpfungskette (Konzeption-Konstruktion-Auslegung-Herstellung-Qualitätssicherung und Recycling). Eine wesentliche Herausforderung stellt dabei die Gewährleistung der langzeit-betriebssicheren Verbindung der beiden Werkstoffe unter komplexen Lastkollektiven und Umwelteinflüssen da.

Dieser Aufgabe folgend wurden mehrere Entwicklungen vorangetrieben, welche speziell auf die Duroplast-Metall-Hybridbauweise ausgerichtet sind:

- Werkstoffauswahl und -modifikation, Materialvorbehandlungen, Haftvermittler.
- Entwicklung von Charakterisierungsmöglichkeiten des Haftverbundes.
- Auslegungs- und Designkriterien.
- Entwicklung eines angepassten Spritzgießprozesses und eines auf diesen Prozess abgestimmten Werkzeuges.
- Entwicklung eines Recyclingkonzeptes.

1.2 Ablauf des Vorhabens

Gestartet wurde das Projekt März 2020 mit einer ursprünglich geplanten Laufzeit von 2,5 Jahren bis September 2022. Durch die Covid-Pandemie und einhergehende Problematiken konnte der ursprüngliche Zeitplan nicht mehr gehalten werden. Das Projekt wurde daraufhin bis Februar 2023 verlängert. In den monatlich stattgefundenen Projektmeetings wurden die Ergebnisse der einzelnen Projektpartner vorgestellt, diskutiert und nächste Schritte abgestimmt. Außerhalb der Regeltermine fanden weitere Onlinemeetings zur Ergebnisdiskussion statt.

1.3 Wesentliche Ergebnisse

Durch die intensive Zusammenarbeit im Forschungsverbund konnten, durch eine Kombination aus Werkstoffwahl, Materialvorbehandlungen, Oberflächenmodifikation, Auslegung eines Spritzgießprozesses und Bauteils sowie der Entwicklung eines entsprechenden Werkzeuges, hybriden Prototypen / Demonstratoren erfolgreich hergestellt werden.

2 Teil II - Eingehende Darstellung

2.1 AP0: Projektbegleitende Maßnahmen

Die Sicherstellung des Informations- und Ergebnisaustausches wurde durch die regelmäßige Teilnahme an monatlichen Konsortialtreffen, zu welchem die Bakelite GmbH immer eine Präsentation der Ergebnisse beitrug, sichergestellt. Weiterhin beteiligte Bakelite sich aktiv an den fachlichen Diskussionen.

2.2 AP1: Projektierung

Alle wirtschaftlichen und technischen Anforderungen an Materialien, Bauteile und Prozesse wurden im Rahmen von Telefonkonferenzen erarbeitet und definiert. Das Ergebnis ist auf der einen Seite ein Lastenheft der Bauteilanforderungen und auf der anderen Seite die Fähigkeitsübersicht der von der Firma Bakelite bereitgestellten Produkte Bakelite® PF 1110-9005-S2, Bakelite® PF 6510-9005-S1, Bakelite® PF 6680-9005-S1 sowie Bakelite® EP 8111-9005-P1 und Bakelite® EP8412-9005-S6. Insbesondere die Anforderungen entlang der Wertschöpfungskette wurden definiert und entsprechende Prüfmethode für diese Anforderungen, soweit verfügbar, kommuniziert und evaluiert. Um den Aufwand der Materialprüfung abgestuft und priorisiert zu dosieren, wurde im Projektkonsortium entschieden zunächst die beiden Produkte mit den höchsten Steifigkeiten in die nähere Auswahl zu ziehen. Dies sind die Produkte Bakelite® PF1110-9005-S2 und Bakelite® EP8111-9005-P1. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen im Typ des Bindemittelsystems und damit verbunden der Härtingsart. Die PF-Variante ist ein Novolak/ Hexamethylentetramin System, welches als Kondensationsreaktion aushärtet, wohingegen die EP-Variante als Polyaddition vernetzt. Im ersteren werden Spaltprodukte während der Aushärtungsreaktion frei. Im EP-System ist dies nicht der Fall. Als zusätzliche Motivation zur Wahl dieser beiden Sorten ist die hohe Verfügbarkeit der Materialdaten zu nennen. Die Kosten beider Sorten liegen in dem vom Projektpartner Schaeffler definierten Zielkorridor. Eine Abschätzung des Kostenumfanges einer möglichen Materialmodifikation ergab sich aus dem definierten Kostenkorridor. Eine detaillierte Analyse möglicher Materialmodifikationen erfolgte nicht, da die Zielrichtung einer möglichen Produkthanpassung nicht verfügbar war.

2.3 AP2: Materialauswahl und Probekörperherstellung

2.3.1 Adhäsionsuntersuchungen

Zur Bewertung der Adhäsion der genannten Formmassen auf in Frage kommenden Metalloberflächen wurde eine Methode erarbeitet, bei welcher ein Metallstempel, aus denen im Projekt betrachteten Legierungen und Formmassen, verpresst und im Rahmen einer axialen Zugbelastung bis zum Bruch belastet wurde. Die resultierende Bruchkraft stellt ein Maß der Adhäsion dar. Es wurde festgestellt, dass die Einwaage der Formmasse auf die Stempel ein besonders kritisches Detail darstellte. Bei einer zu geringen Einwaage werden die Stempeloberflächen nicht vollständig mit der Formmasse verpresst, als Versuchsergebnis würden zu geringe Bruchkräfte festgestellt werden. Bei einer zu hohen Einwaage fließt beim Verpressen die Formmassenschmelze über die Stempeloberflächen hinweg ins Werkzeug und verklebt dort den Stempel mit der Werkzeugwand. Valide, ausgesuchte, Versuche an Bakelite® EP8111-9005-P1 zeigten, dass Tendenzen hinsichtlich Adhäsionsneigungen auf den unterschiedlichen Metallen festgestellt werden können, jedoch aufgrund der genannten Probleme in der Probenpräparation stark schwankend sind. Zudem ist die Probenpräparation zeitlich aufwändig.

Abschlussbericht DuroHyb

Eine Alternative zu dem beschriebenen Verfahren wurde erarbeitet bei dem die Prüfkammer eines Rubber Capillary Rheometer (RCR) modifiziert wurde, sodass dieses als Presse arbeitet. Metallbögen der zu untersuchenden Metalle wurden vom Projektpartner Schaeffler bereitgestellt und entsprechend der Werkzeuggeometrie in ca. 10 x 30mm Einleger eingekürzt. Der Projektpartner DEWE Brünofix unterstützte mit der Bereitstellung der Reinigungschemikalien und dem Erarbeiten des Reinigungsprozesses der eingekürzten Metalleinleger. Zum Verpressen wurden die Einleger in die beheizte Presse vorgelegt und für 60 Sekunden vorgewärmt. Auf den vorgewärmten Probekörpern wurde Formmassengranulat aufgegeben und dieses mit dem Einleger verpresst (180°C mit 200bar für 5min). Das Resultat ist ein hybrider Probekörper wie in Abbildung 2.1 dargestellt.



Abbildung 2.1 Hybrider Probekörper (Rohzustand).

Die Kunststoffmatrix (blauer Bereich, Abbildung 2.2) wurde im Nachgang entfernt, sodass nur der hybride Probekörper aus verpresster Formmasse und Metalleinleger übrigblieb.



Abbildung 2.2 Verdeutlichung der Freilegung des Probekörpers, links (blauer Bereich).
Endgültiger Probekörper, rechts.

Keine Kombination aus Formmasse und Metalleinleger zeigte initial eine hinreichende Adhäsion. Alle Probekörper zeigten starke bis mäßige Delaminationen nach dem Freilegen (siehe Abbildung 2.3). Die besten Ergebnisse mit Bakelite® PF1110-9005-S2 und Bakelite® EP8111-9005-P1 zeigte die Stahllegierung 16MnCr5.

Abschlussbericht DuroHyb



Abbildung 2.3 Delamination von Einleger und verpresster Formmasse (rot) und abgelöster Einleger und korrespondierende Formmassenschicht (rechts)

Eine Parameterstudie hinsichtlich der Pressparameter (Druck, Temperatur, Presszeit) zeigte keinen wesentlichen Einfluss auf eine mögliche Optimierung des Haftverbunds. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden Versuche zur Bewertung des Einflusses von zusätzlichen Oberflächenstrukturierungen auf den Metalloberflächen durchgeführt. Dazu wurden vom Projektpartner Schaeffler Metalleinleger bereitgestellt, die beim Projektpartner DEWE Brünofix nachträglich phosphatiert wurden. Phosphatierungen sind chemische Oberflächenstrukturierungen zur Vergrößerung der Oberfläche und zur intensiveren mechanischen Verkrallung des zu haftenden Materials. Ein erfolgreicher Haftverbund konnte hinsichtlich Bakelite® EP8111-9005-P1 auf 16MnCr5 mit einer Zn-Phosphatierung sowohl mit als auch ohne Passivierung reproduzierbar erreicht werden. Passivierungsschichten dienen dazu die erzeugten Oberflächenstrukturen chemisch zu passivieren / „zu konservieren“, sodass keine nachträglichen Oberflächenreaktionen, mit z.B. Sauerstoff, die Strukturierungen unkontrolliert verändert. Die besten Ergebnisse hinsichtlich Bakelite® PF1110-9005-S2 konnten auf 16MnCr5 mit einer Mn- / ZnCa-Phosphatierung erzielt werden. Laserstrukturierte Oberflächen wurden nicht im Rahmen der genannten Pressversuche bewertet.

2.3.2 Entwicklung eines chemischen Haftvermittlers als mögliche Alternative zur chemischen Oberflächenstrukturierung

Aufgrund einer möglichen Gefährdung des Erreichens des Meilensteins einen Haftverbund zu realisieren, wurde sich im Rahmen des Projektkonsortiums auf die Entwicklung eines chemischen Haftvermittlers als mögliche Alternative geeinigt. Gegenüber einer Laserstrukturierung und Phosphatierung kann ein Haftvermittler folgende Vorteile bieten:

- Keine thermische Belastung im Metallgefüge.
- Stabil gegenüber äußeren mechanischen Beanspruchungen.
- Chemische Vernetzung mit dem Formmassenanteils des Hybridverbundes.

Abschlussbericht DuroHyb

Die Entwicklung des Haftvermittlers wurde auf Basis einer Epoxydharzabmischung durchgeführt. Epoxydharze eignen sich aufgrund ihres Reaktionsmechanismus (Polyaddition) und der dadurch nicht entstehenden Spaltprodukte im ersten Schritt besser als entsprechende Phenolharzabmischungen. Dazu wurden Versuche durchgeführt in dem Bakelite® PF1110-9005-S2 sowie Bakelite® EP8111-9005-P1 zwischen den in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Stempeln ausgehärtet und im Anschluss mit einem Drehmomenten Schlüssel, von Hand, abgeschert wurden. Bakelite® PF1110-9005-S2 und Bakelite® EP8111-9005-P1 zeigten auch im Rahmen dieser Versuche keinen ausreichend vorhandenen Haftverbund. Mit dem reinen Haftvermittler (ohne Formmasse) behandelte und ausgehärtete Stempel zeigten einen so intensiven Haftverbund, dass die Schrauben zur Einleitung der Scherkräfte abgerissen sind der Haftverbund jedoch weiterhin intakt blieb (siehe Abbildung 2.4). Ähnlich intensive Haftverbunde konnten hinsichtlich der Stahlsorten X155CrVMo12-1 und S355 festgestellt werden.



Abbildung 2.4 16MnCr5-Haftverbund (Stempelprobekörper) unter Verwendung des EP-Haftvermittlers

Es konnte des Weiteren festgestellt werden, dass der Aushärtegrad (α) des Haftvermittlers einen Einfluss auf den resultierenden Haftverbund zwischen Formmasse und Metall zeigte. Ein komplett ausgehärteter Haftvermittler zeigte einen reduzierteren Haftverbund. Stempelversuche mit anvernetzten Haftvermittler und verpresster Formmasse zeigten bzgl. 16MnCr5 gute Haftverbunde. Delaminationseffekte konnten nicht beobachtet werden. Bestätigt wurden die Ergebnisse im Rahmen von durchgeführten Pressversuchen im modifizierten RCR (siehe Abbildung 2.5). Bei Bakelite® EP8111-9005-P1 auf 16MnCr5 konnte keine Delamination der verpressten Probekörpers festgestellt werden. Bei Bakelite® PF1110-9005-S2 schwankte das Ergebnis. Es konnten sowohl vollständig Probekörper als auch delaminierte Probekörper festgestellt werden.

Abschlussbericht DuroHyb

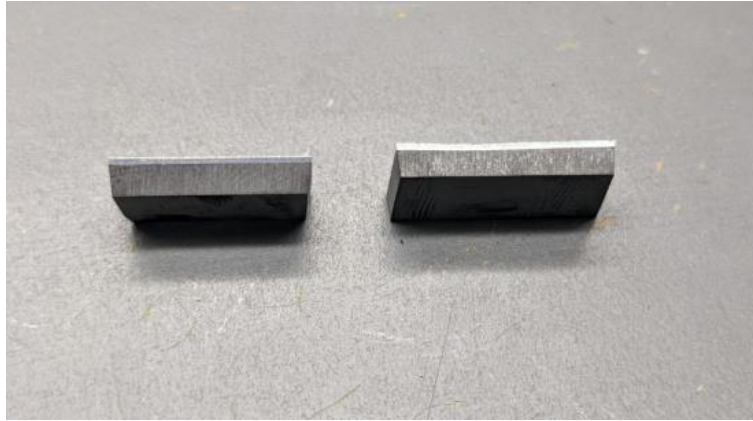


Abbildung 2.5 Hybrider Probekörper aus Bakelite® PF1110-9005-S2 und Bakelite® EP8111-9005-P1 auf 16MnCr5

Ebenfalls festgestellt wurde, dass aufgrund von unterschiedlichen Oberflächenenergien zwischen aufgeschmolzenen Haftvermittler und Metalloberfläche der Haftvermittler nur mäßig gut die Metalloberflächen benetzt (siehe Abbildung 2.6). Trotz dieser unregelmäßigen Benetzungen konnten die beschriebenen intensiven Haftverbunde erzielt werden.



Abbildung 2.6 Stempeloberfläche mit applizierten Haftvermittler vor (links) und nach (rechts) der Aushärtung

Versuche mit gelösten Haftvermittler zeigten eine deutliche Verbesserung des Benetzungsverhaltens. Dabei wurden unterschiedliche Konzentrationen an Haftvermittler gelöst, auf 16MnCr5 appliziert und das Benetzungsverhalten visuell bewertet. In Lösung aufgetragener Haftvermittler ergab eine dünnere, gleichmäßigere und vollflächige Benetzung (siehe Abbildung 2.7).

Abschlussbericht DuroHyb



Abbildung 2.7 Haftvermittler rieselfähig aufgetragen und ausgehärtet(links) und rechts als Lösung aufgetragen und ausgehärtet (Substrate jeweils 16MnCr5).

Bakelite® EP8111-9005-P1 und Bakelite® PF1110-9005-S2 zeigten keine ersichtlichen Unterschiede im Adhäsionsverhalten bei unterschiedlich applizierten Haftvermittler. Den Einfluss unterschiedlicher Lösemittel auf das resultierende Adhäsionsverhalten wurde nicht untersucht. Die Aufbringung in gelöster Form könnte Vorteile in der Applizierung bei senkrechten bzw. geneigten Oberflächen bieten, wo eine rieselfähige Aufbringung nicht realisierbar wäre. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Temperaturstabilität des Haftvermittlers. Der Haftvermittler muss auch unter erhöhten Temperaturen stabil bleiben und darf den Haftverbund nicht durch Erweichung schwächen. Zwecks Identifizierung der Erweichungstemperaturen wurden Analysen vom Haftvermittler per dynamisch mechanischer Analyse (DMA) in rieselfähiger als auch gelöster Form durchgeführt. Dazu wurden Metalltaschen aus Edelstahl mit dem Haftvermittler befüllt (Pocketmethode) und mit einer Temperaturrampe von 3 K/min hinsichtlich des Verlaufes des Speichermoduls und der Dämpfung analysiert.

Abschlussbericht DuroHyb

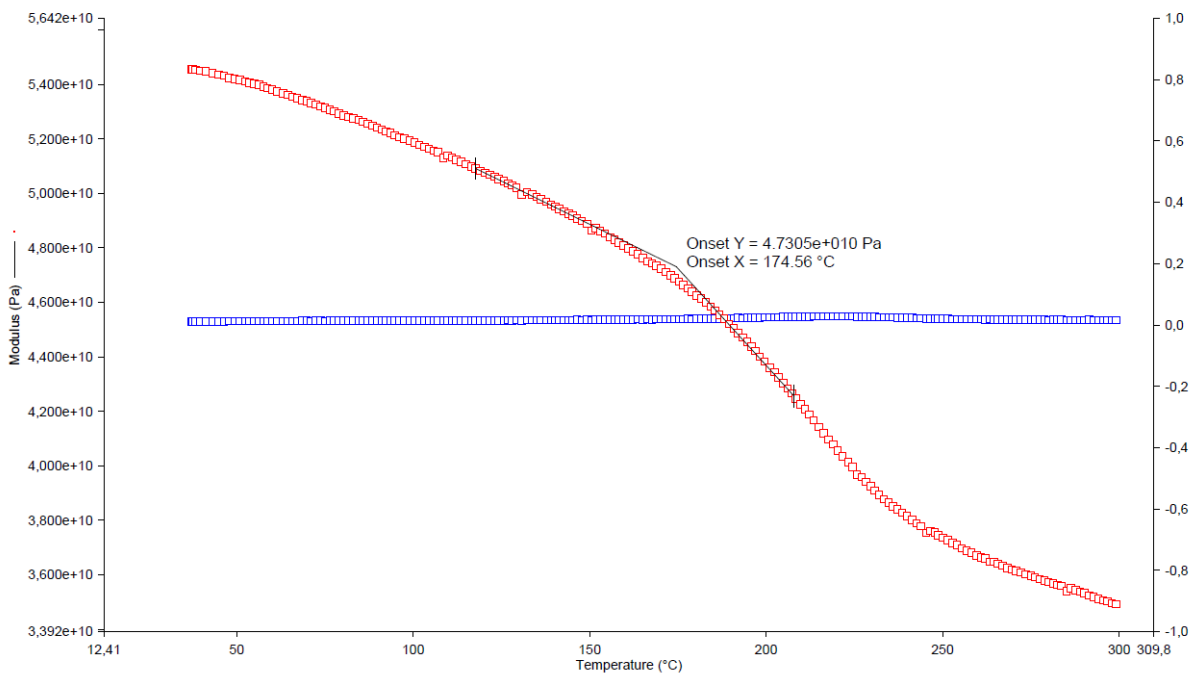
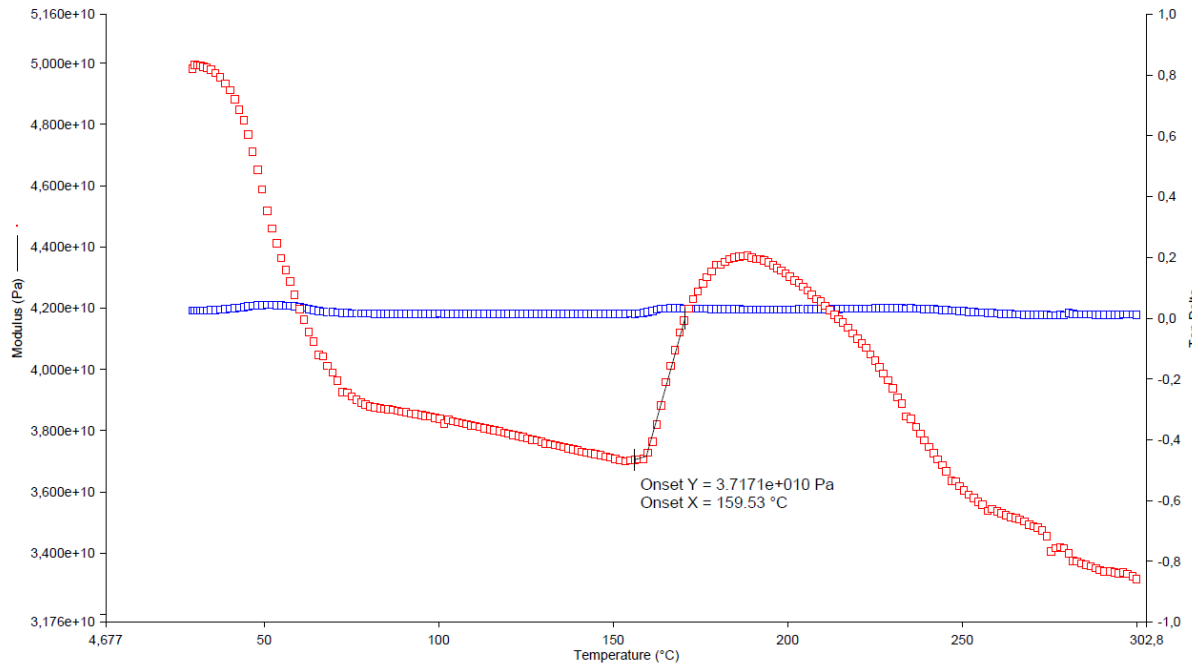


Abbildung 2.8 Verlauf Speichermodul und Dämpfung des rieselfähigen Haftvermittlers. 1.Lauf (oben) 2.Lauf (unten).

Abschlussbericht DuroHyb

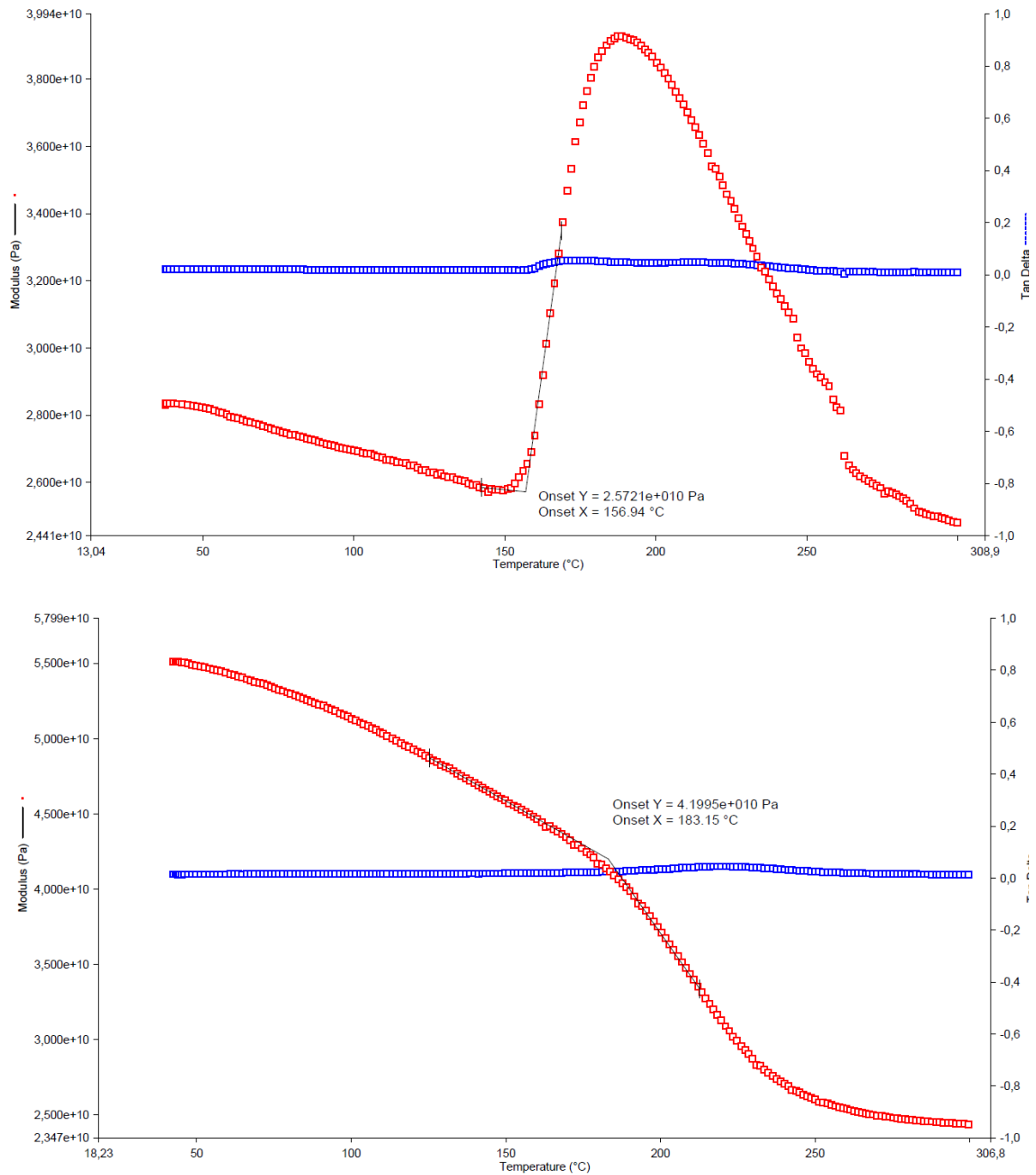


Abbildung 2.9 Verlauf Speichermodul und Dämpfung des gelösten Haftvermittlers. 1.Lauf (oben) 2.Lauf (unten).

Der Schmelzbereich des rieselfähigen Haftvermittlers liegt bei ca. 45°C, eine vernetzungsbedingte Zunahme der Festigkeit konnte ab einer Temperatur von 160°C festgestellt werden (siehe Verlauf Speichermodul in Abbildung 2.8). Die Glasübergangstemperatur, welche in einem zweiten Lauf, nach vollständiger Vernetzung durchgeführt wurde, liegt bei ca. 180°C (siehe Abbildung 2.8 und Abbildung 2.9). Die Haftvermittlerlösung zeigte im Vergleich zur rieselfähigen Variante keine signifikanten Unterschiede des Vernetzungsverhaltens oder der

Abschlussbericht DuroHyb

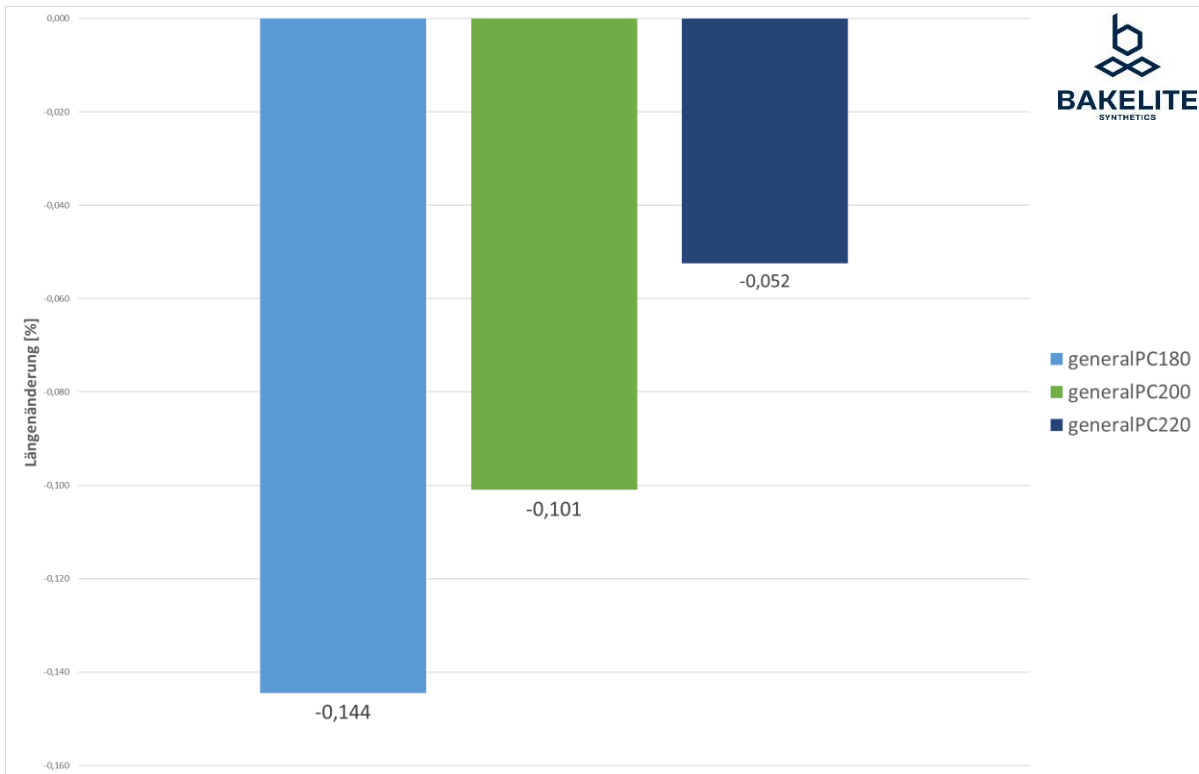


Abbildung 2.11 Resultierende Längenänderung von Bakelite® PF1110-9005-S2 nach unterschiedlichen Temperaturen (negative Längenänderung = Schwindung).

Abschlussbericht DuroHyb

Per TMA (Thermomechanischer Analyse) wurde der Verlauf der Dimensionsänderung während des Temperns analysiert (siehe Abbildung 2.12).

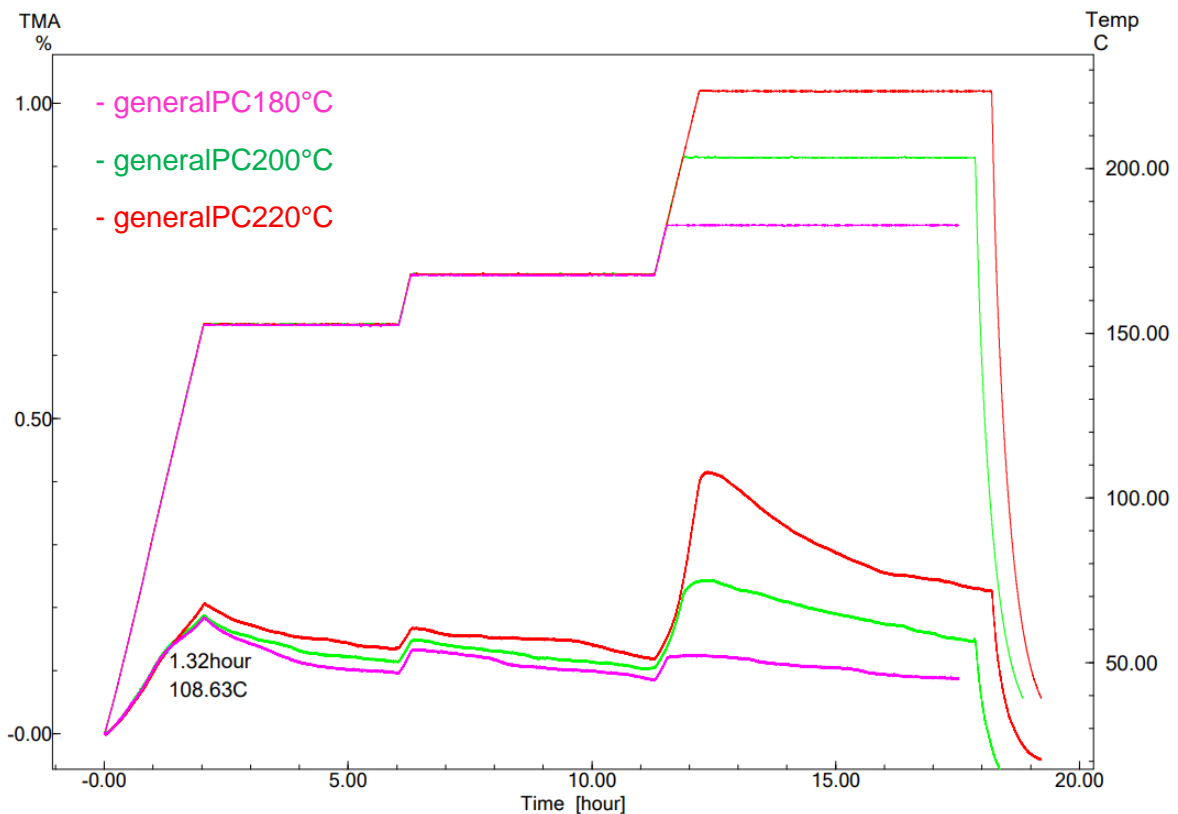


Abbildung 2.12 Verlauf der Dimensionsänderung bei Temperung bestimmt per TMA unten, korrespondierende Temperprogramme oben

Das Material dehnt sich mit zunehmender Temperatur aus, zieht sich dann, aufgrund der einsetzenden Nachvernetzung und Dichtezunahme, in den jeweiligen isothermen Haltezeiten, wieder zusammen (Schwindung). Ist die Haltezeit lang genug so wirkt die langsam ablaufende Nachvernetzung bzw. Schwindung der zuvor ablaufenden Ausdehnung entgegen und eine insgesamt negative Volumen-/ Dimensionsänderung resultiert. Ab Temperaturen von ca. 160°C (im Bereich des Glasübergangspunktes) ist der rein linearen Ausdehnung eine irreversible Ausdehnung immer stärker überlagert (siehe Abbildung 2.13).

Abschlussbericht DuroHyb

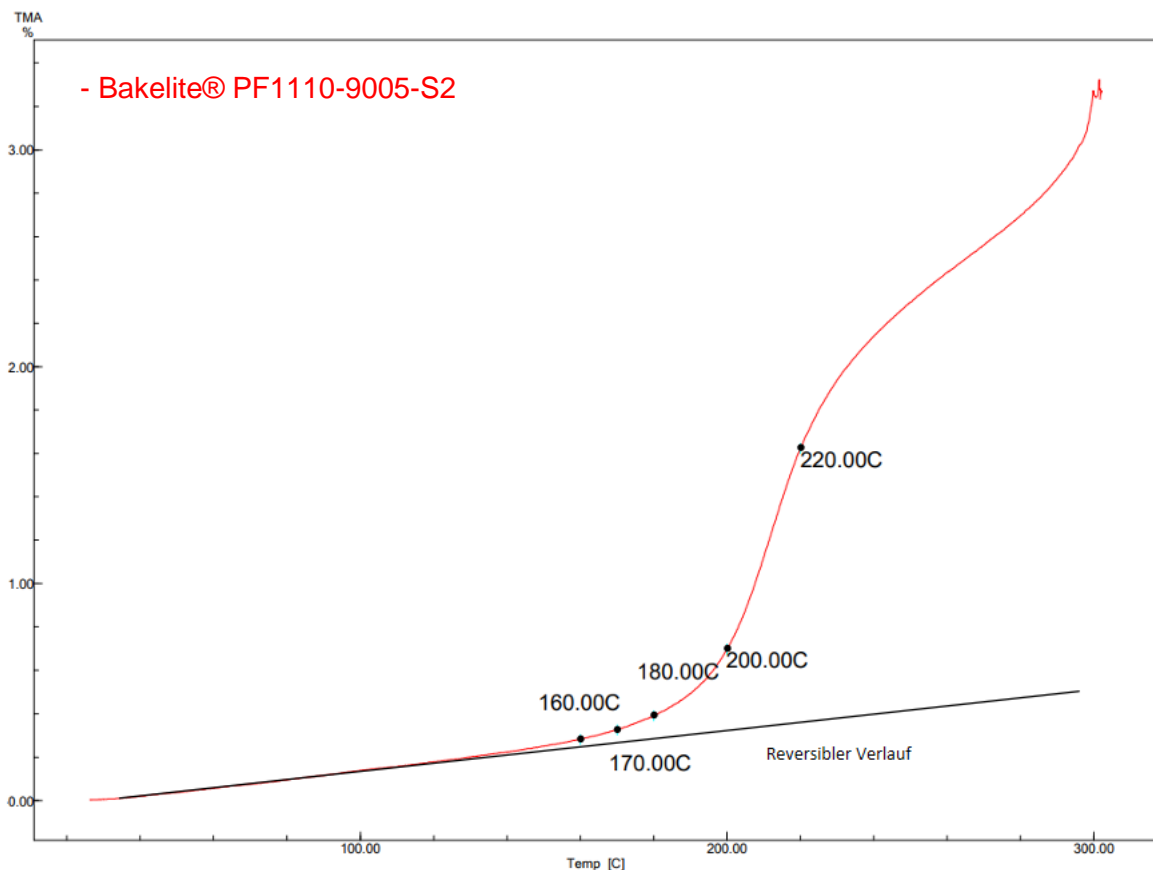


Abbildung 2.13 Reversible und nicht reversible Ausdehnung in Abhängigkeit der Temperatur.

Kinetisch bedingt nimmt die Vernetzungsrate bei Erhöhung der Temperatur zu und die Nachvernetzung läuft schneller ab (Abbildung 2.12 Zeitintervall 11h – 18h). Ist die Zunahme an irreversibler Ausdehnung im Temperaturbereich des Glasübergangspunktes größer als die zeitgleich einsetzende Schwindung, kann die stattfindende Ausdehnung nicht mehr durch Schwindung kompensiert werden. Es resultiert insgesamt eine Volumenzunahme. Wird der 180°C Haltephase eine 200°C Haltephase nachgeschaltet (generalPC180200), so kann in der 180°C Haltephase ein ausreichend hoher Glasübergangspunkt / Netzwerkdichte entwickelt werden und das Material dehnt sich in der 200°C Phase weniger stark aus. Es resultiert dann eine größere Schwindung wie bei generalPC180 oder generalPC200 (siehe Abbildung 2.14). Eine Reduzierung der maximalen Haltetemperatur auf 150°C zeigte eine geringere resultierende Schwindung aufgrund der zeitlich zu langsam ablaufenden Nachvernetzung. Obwohl generalPC180200 eine höhere Schwindung zeigte, wurde für das Projekt weiterhin generalPC180 aufgrund der geringeren Laufzeit empfohlen.

Abschlussbericht DuroHyb

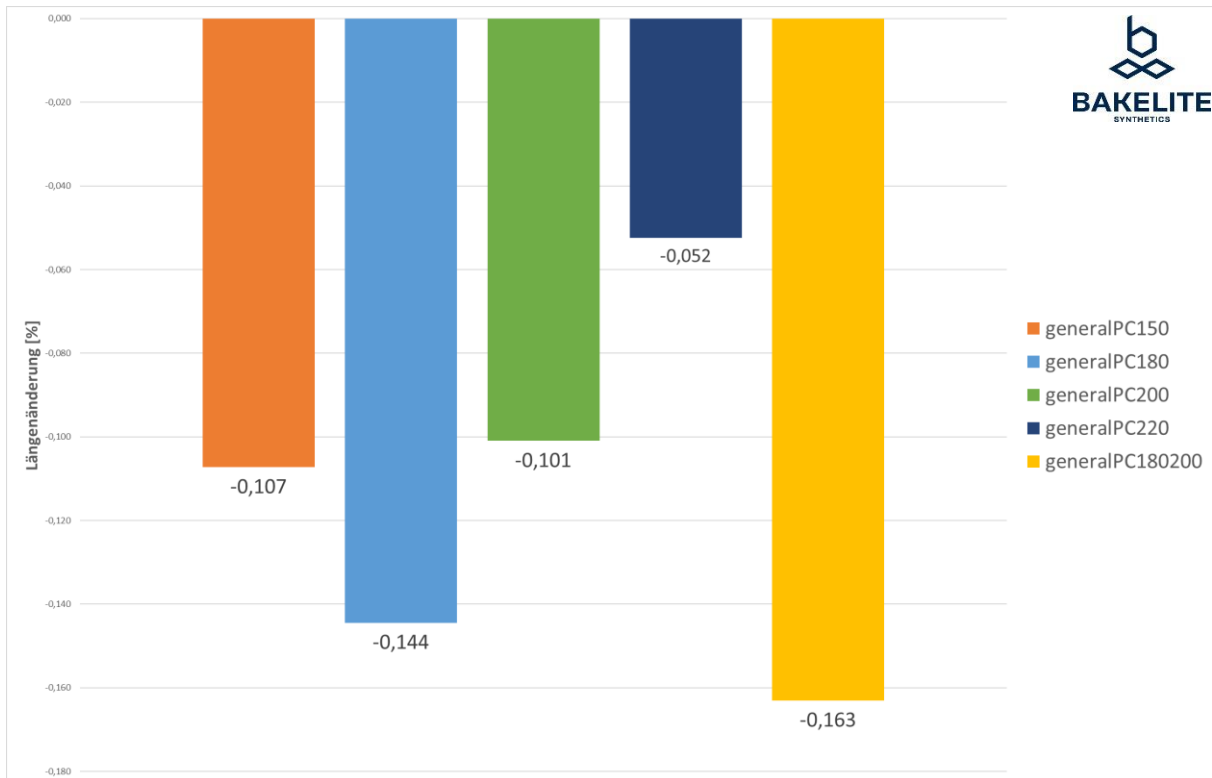


Abbildung 2.14 Resultierende Längenänderung im Vergleich bei unterschiedlichen maximalen Temperaturen während des Temperns

2.4.1 Erstellung eines Kinetikmodells der Härtung

Auf Basis des von Kamal und Sourour entwickelten Kinetikansatzes für Duroplasten wurde mit Hilfe der Kinetik Software NeoKinetic der Fa. Netzsch ein kinetisches Modell der Härtung von Bakelite® EP8111-9005-P1 und Bakelite® PF1110-9005-S2 auf Basis von DSC-Daten erstellt. Zur Validierung der Modelle wurden die entsprechenden Granulate unter definierten Temperaturen und Zeiten lose verpresst und das verpresste Formteil schnellstmöglich abgekühlt. Von den verpressten Formteilen wurden Materialproben entnommen und per DSC analysiert. Zur Bewertung des Aushärtegrades wurde die Restreaktivität (Wärmemenge) der Formteilprobe ($H_{Formteil}$) per DSC bestimmt und ins Verhältnis zur Reaktionenthalpie des Ausgangsgranulates ($H_{Granulat}$) gestellt:

$$\alpha = 1 - \frac{H_{Formteil}}{H_{Granulat}}$$

Tabelle 1 zeigt den Vergleich zu den per DSC bestimmten und per Kinetikmodell errechneten Aushärtegraden.

Abschlussbericht DuroHyb

Tabelle 1 Vergleich zwischen berechneten (alpha DSC) und simulierten (alpha Sim) Aushärtegraden bzgl. Bakelite® EP8111-9005-P1

Zustand	alpha DSC [%]	alpha Sim [%]	Abweichung [%]
Granulat	0,0	0	0
2min @ 130°C	13,0	12	1,0
3min @ 130°C	19,5	18	1,5
5min @ 140°C	60,2	61	0,8

Hinsichtlich der Abweichungen zwischen Simulation und berechneten Aushärtegrade per DSC ergaben sich für ausgewählte Aushärtezustände Abweichungen von 1,5%. Die Modellvalidierung nach der beschriebenen Methode wurde im Rahmen der Projektlaufzeit für Bakelite® EP8111-9005-P1 abgeschlossen.

AP7: Prüftechnik und Qualitätssicherung

2.4.2 Beschreibung der Prozessschwindung

Zur Beschreibung der Prozessschwindung wurde ein Konzept untersucht bei dem die Kapillare eines RCR (Rubber Capillary Rheometer) verschlossen wurde, sodass ein abgeschlossenes, definiertes Prüfvolumen entsteht. Die Messungen können isobar und isotherm durchgeführt werden. Ein vorgegebener Prüfdruck wird geregelt, indem ein Stempel durch Positionsänderung das Prüfvolumen be- oder entlastet. Dehnt sich die Probe während der Messung aus (Druck steigt an) wird der Stempel herausgefahren, sodass das Probenvolumen entlastet wird und weiterhin isobare Bedingungen gelten. Umgekehrt wird bei einer Volumenabnahme der Stempel nachgefahren, um weiterhin den gewünschten Prüfdruck aufrecht zu halten. Das Konzept sah vor dieses Regelverhalten auszunutzen um durch die Stempelposition (unter vorgegebenen Temperaturen und Drücken) eine Reaktionsschwindung (Volumenabnahme $(-\Delta V)$ = Druckabfall und Nachregelung per Stempelposition) zu identifizieren (siehe Abbildung 2.15).

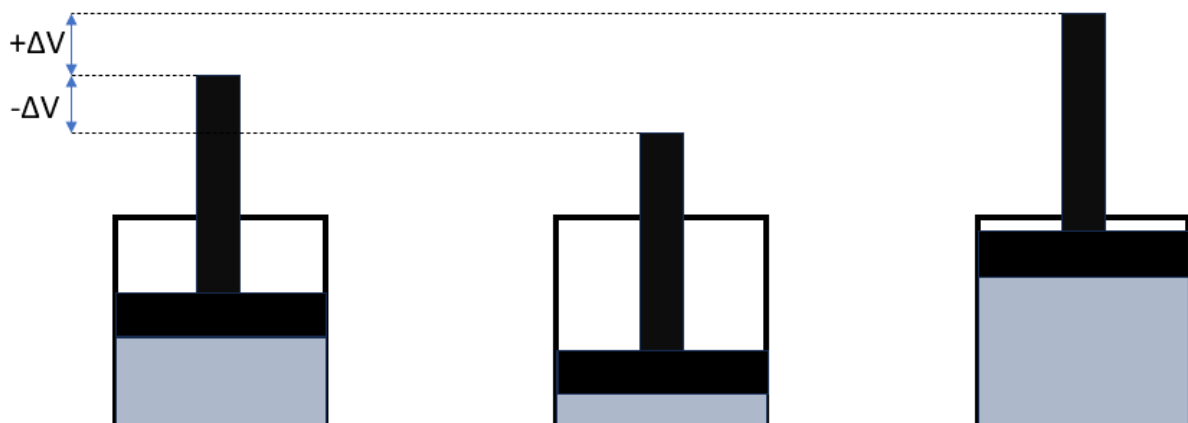


Abbildung 2.15 Prinzip des Messaufbaus

Abschlussbericht DuroHyb

Eine Basislinie des Gerätes in der beschriebenen Messkonfiguration wurde bestimmt, indem unter isothermen Bedingungen eine Leerkammermessung und eine Messung mit einem Metalleinleger (Kein Schmelzen, sehr geringes thermisches Ausdehnen im Vergleich zu Polymeren) durchgeführt wurde. Wie erwartet ergab sich keine Veränderung in der Stempelposition bei den genannten Messungen (siehe Abbildung 2.16).

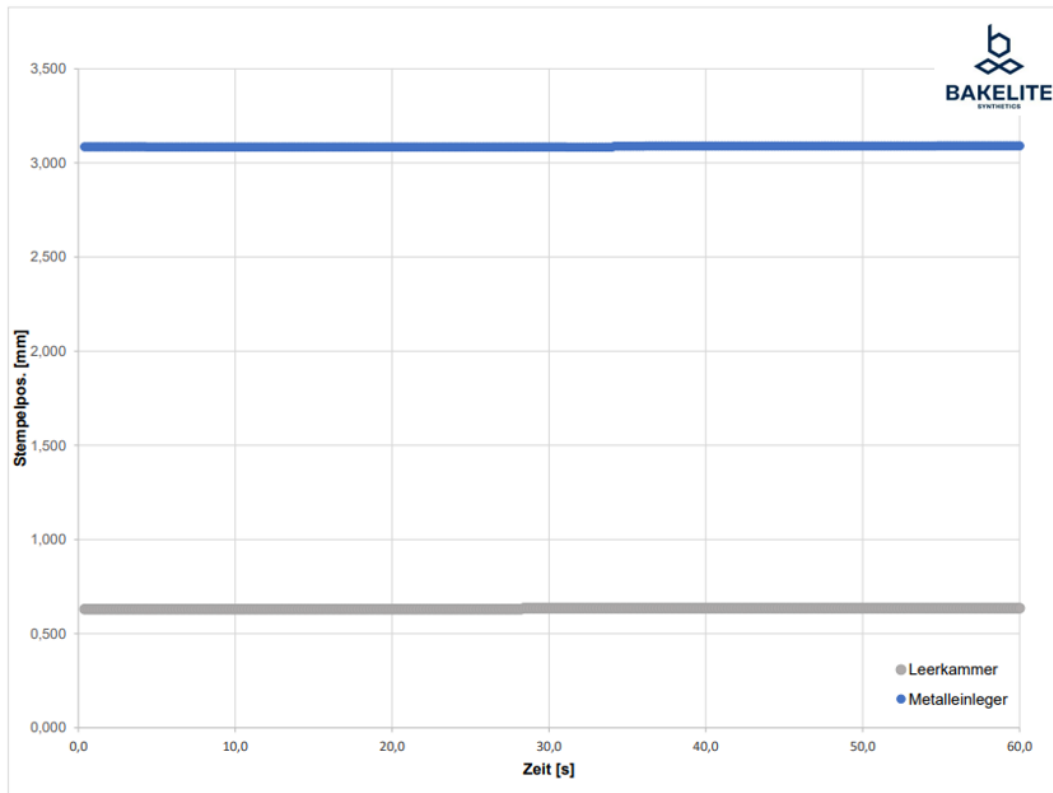


Abbildung 2.16 Basislinienbestimmung des modifizierten RCR

Aufbauend auf diesem Ergebnis wurden Versuche mit HDPE durchgeführt. Dieser Thermoplast kann beim Aufschmelzen allerdings nicht vernetzungsbedingt Schwinden. Somit sollten zunächst reine Aufschmelzvorgänge dem resultierenden Kurvenverlauf zugeordnet werden. Das HDPE wurde dazu in aufgeschmolzener Form (kein Aufschmelzvorgang während der Messung) sowie in Pastillen / Granulatform (Aufschmelz- und Kompressionsvorgänge finden statt) aufgegeben. In Schmelzform zeigte sich unter isothermen Bedingungen eine permanente Volumenzunahme ($+\Delta V$, Stempelposition erhöht sich zur Druckentlastung). Nach 30 Minuten wurde die Messung abgebrochen. Der Kurvenverlauf zeigte zu diesem Zeitpunkt noch keinen stationären Verlauf (siehe Abbildung 2.17). Versuche mit Granulat zeigten zunächst ein Verringern der Stempelposition, welche einem Aufschmelzvorgang zugeordnet werden kann (siehe Abbildung 2.17).

Abschlussbericht DuroHyb

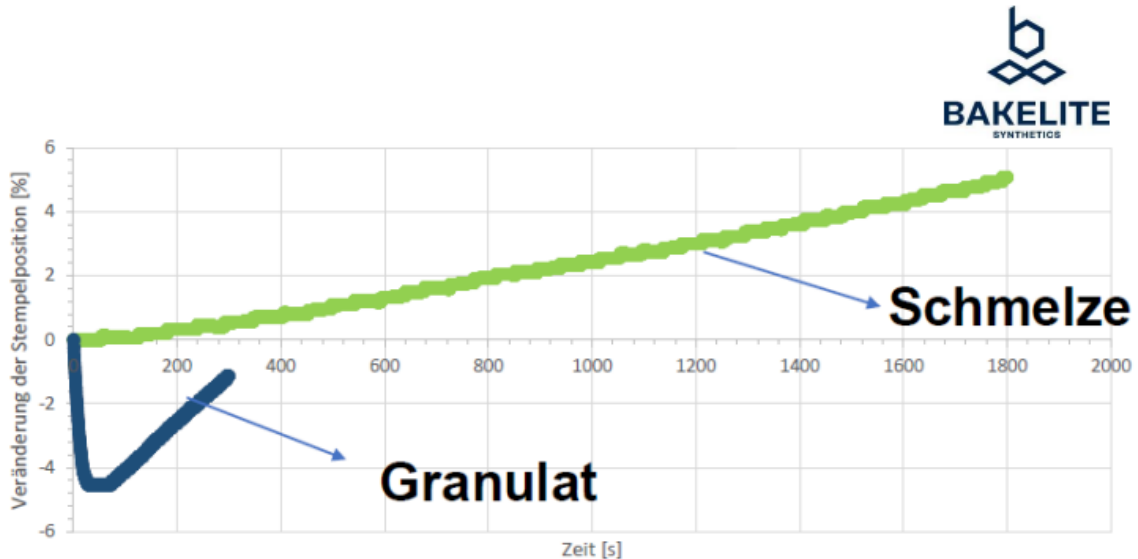


Abbildung 2.17 Verhalten des HDPEs eingebracht als Schmelze und als Granulat

Weitere Versuche wurden mit Formmassengranulat des Typs Bakelite® PF6510-9005-S1 durchgeführt. Ähnlich dem HDPE sollten Aufschmelz- und Kompressionsvorgänge sichtbar werden, zusätzlich wurde eine durch die Vernetzungsreaktion bedingte Volumenabnahme erwartet. Im Unterschied zum HDPE kam es reproduzierbar nach einer Zunahme der Stempelposition (+ ΔV) zu einer Abnahme der Stempelposition (- ΔV) (siehe Abbildung 2.18).

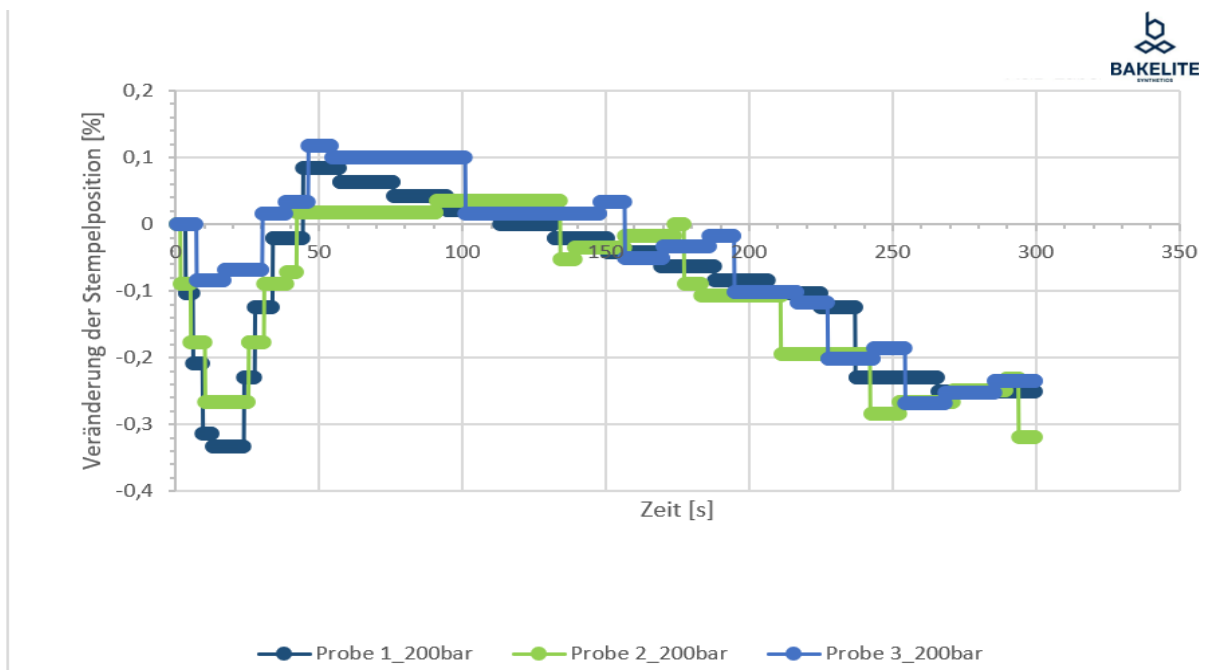


Abbildung 2.18 Verlauf der Stempelposition unter isobaren und isothermen Bedingungen

Abschlussbericht DuroHyb

Sowohl die Versuche mit HDPE als auch mit Formmassengranulat zeigten, dass bei der Aufgabe von rieselförmigen Darbietungsformen zunächst eine Stempelpositionsverringering stattfindet. Interpretiert werden kann dieses Verhalten durch die Volumenabnahme bedingt durch das Aufschmelzen in Kombination mit Kompressionsprozessen der losen Schüttung. Die folgende Stempelpositionserhöhung $+\Delta V$ könnte eine thermische Ausdehnung charakterisieren. Im Gegensatz zu HDPE schließt sich bei härtbaren Materialien nach einer Volumenzunahme eine Volumenabnahme an welche ggf. die Reaktionsschwindung darstellt. Die beschriebenen Vorgänge dauern jedoch zeitlich betrachtet, aufbauend auf Erfahrungswerten hinsichtlich Reaktionsverhalten und Schwindungsprozessen, sehr lange an und es fehlt ein erwartetes Auslaufen der Kurven auf einen Endwert. Im Rahmen der Projektlaufzeit konnten die Kurvenverläufe nicht vollständig auf Basis des Materialverhaltens aufgeklärt werden. Eine abschließende Aussage zur Prüfmittelfähigkeit des modifizierten RCR hinsichtlich Beschreibung der Reaktionsschwindung konnte nicht getroffen werden.

2.4.3 Methodenentwicklung zur Bestimmung der Dauerfestigkeit per DMA

Die Dauerfestigkeit (Schwingfestigkeit) ist ein Werkstoffkennwert, welcher ein Maß für das Ermüdungsverhalten bei zyklischer Belastung darstellt. Im Rahmen des Projektes sollte eine Methode per DMA entwickelt werden die das dynamische Verhalten eines hybriden Bauteils (auch unter erhöhten Temperaturen und Frequenzen) hinsichtlich Dauerfestigkeit analysieren kann. In der zugänglichen Literatur ist kein Verfahren zur Bestimmung der Dauerfestigkeit von polymeren Werkstoffen per DMA beschrieben. Das Versuchsprinzip beläuft sich darauf, dass der Probekörper einer periodisch-wechselnder mechanischen Belastung bis zum Bruch ausgesetzt wird. Dabei ist zu beachten, dass die Belastung stets unterhalb der Bruchspannung liegen muss. Der im Bereich der Dauerfestigkeitsbestimmung verwendete Begriff „Lastwechsel“ beschreibt hierbei genau einen Beanspruchungszyklus und ergibt sich bei einer DMA-Messung aus dem Zusammenspiel zwischen der Messzeit bis zum Bruch des Probekörpers und der angelegten Schwingungsfrequenz (Beispiel: Bruch nach 500s bei einer Frequenz von $2\text{s}^{-1} = 1000$ Lastwechsel bis zum Materialversagen). Eine Variation der Spannung sollte demnach zu unterschiedlichen Messzeiten bis zum Bruch und bei konstanter Frequenz schließlich zu einer Zu-/Abnahme der Lastwechsel führen. Orientiert wurde sich dabei am Speichermodul E' , welches näherungsweise als ein Maß für die mechanische Festigkeit des Probekörpers angesehen werden kann. Im Rahmen der DMA-Messung sollte ein Materialversagen bzw. Ermüdungsverhalten durch eine stetige Abnahme des Speichermoduls während der DMA-Messung erkennbar sein. Gegenläufig dazu ist das Verlustmodul, welches durch die zunehmende Dissipation von Energie im Ermüdungsfall zunimmt und beim Bruch maximal wird. Um dieses in der Theorie entwickelte Konzept zu validieren, wurde im ersten Schritt eine organisch-gefüllte Labor-PF-Formmasse verwendet (Laborbezeichnung LPF2220), aus welcher möglichst klein-dimensionierte Probekörper präpariert wurden. Diese Formmasse weist bewusst eine geringe mechanische Festigkeit auf, sodass ein Bruch bereits bei geringer Spannung auftritt, und somit das Analysengerät in diesem Fall nicht beschädigt wird. Nach Vorversuchen zu den optimalen Probenabmaßen und Prüfparametern konnten der oben beschriebenen Kurvenverlauf festgestellt werden. Das Verlustmodul nimmt bei einer ausreichenden hohen Spannung mit zunehmenden Lastwechseln, aufgrund des Ermüdungsverhaltens, ab und das Material bricht (siehe Abbildung 2.19).

Abschlussbericht DuroHyb

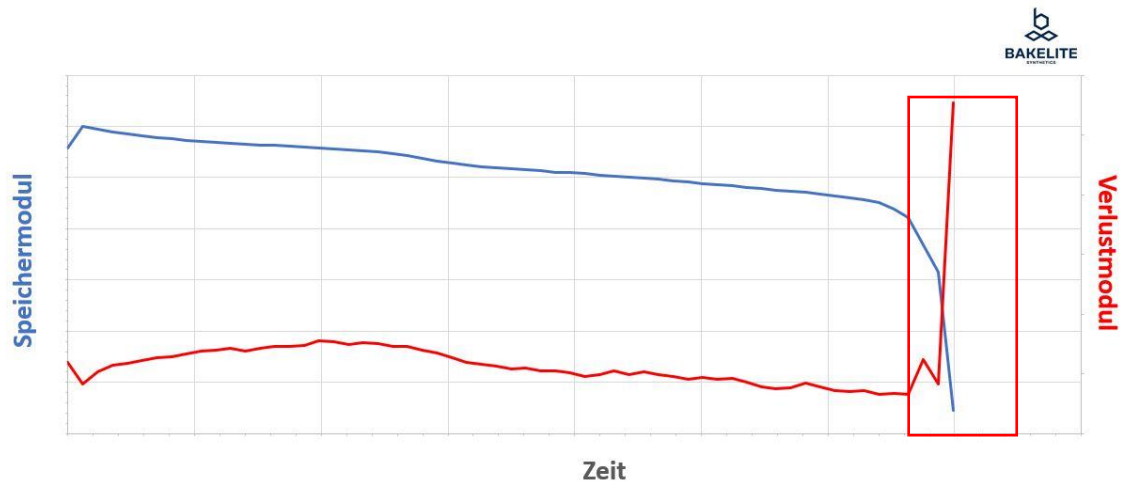


Abbildung 2.19 Verlauf von Speicher - und Verlustmodul von LPF2220 unter isothermen Bedingungen bis zum Bruchversagen (roter Bereich).

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde die Spannung stufenweise reduziert und die Lastwechsel bis zum Bruch bestimmt. Erwartungsgemäß wurde eine Verringerung der Lastwechsel bei Zunahme der Spannung festgestellt (siehe Abbildung 1.10).

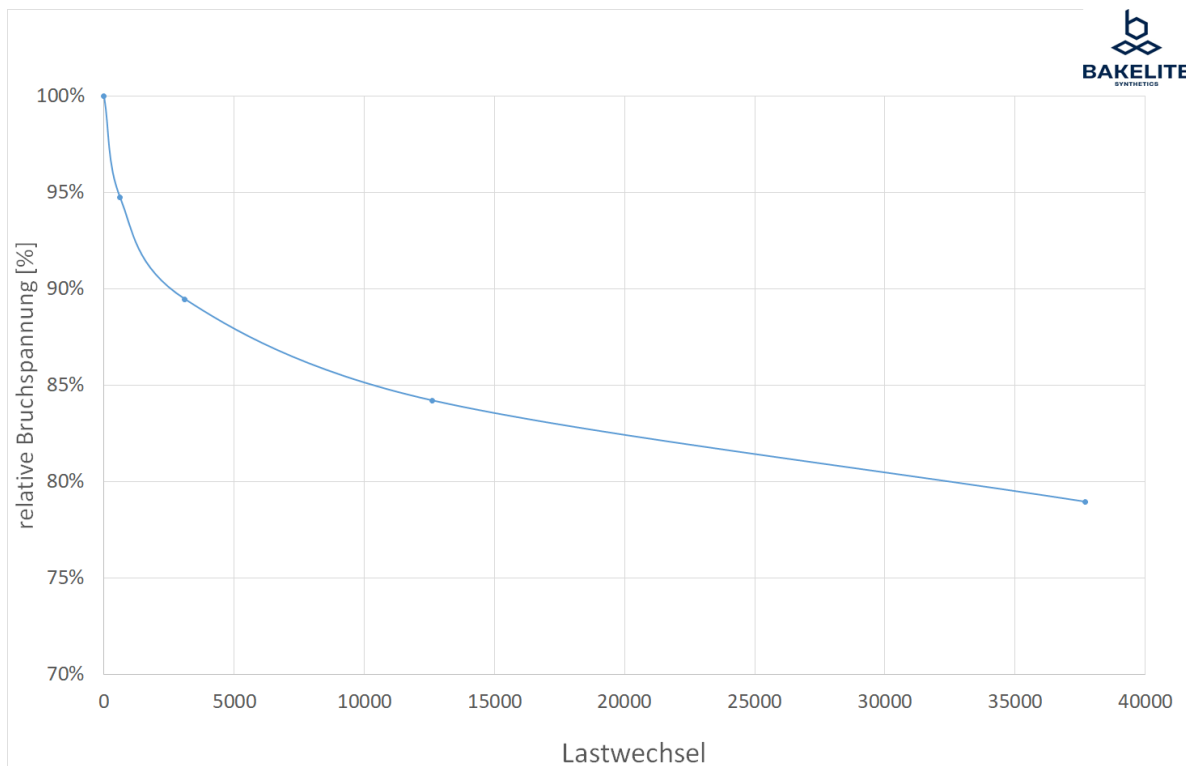


Abbildung 2.20 Abnahme der Lastwechsel bis zum Bruch bei unterschiedlichen Spannungen

Abschlussbericht DuroHyb

Im darauffolgenden Schritt wurde diese Methodik unter Verwendung von Bakelite® PF1110-9005-S2 erneut durchgeführt. Abbildung 1.11 zeigt den stetigen Abfall des Speichermoduls bzw. das Ermüdungsverhalten des Probekörpers bei einer entsprechend einer hoch genug gewählten Spannung (siehe Abbildung 2.21).

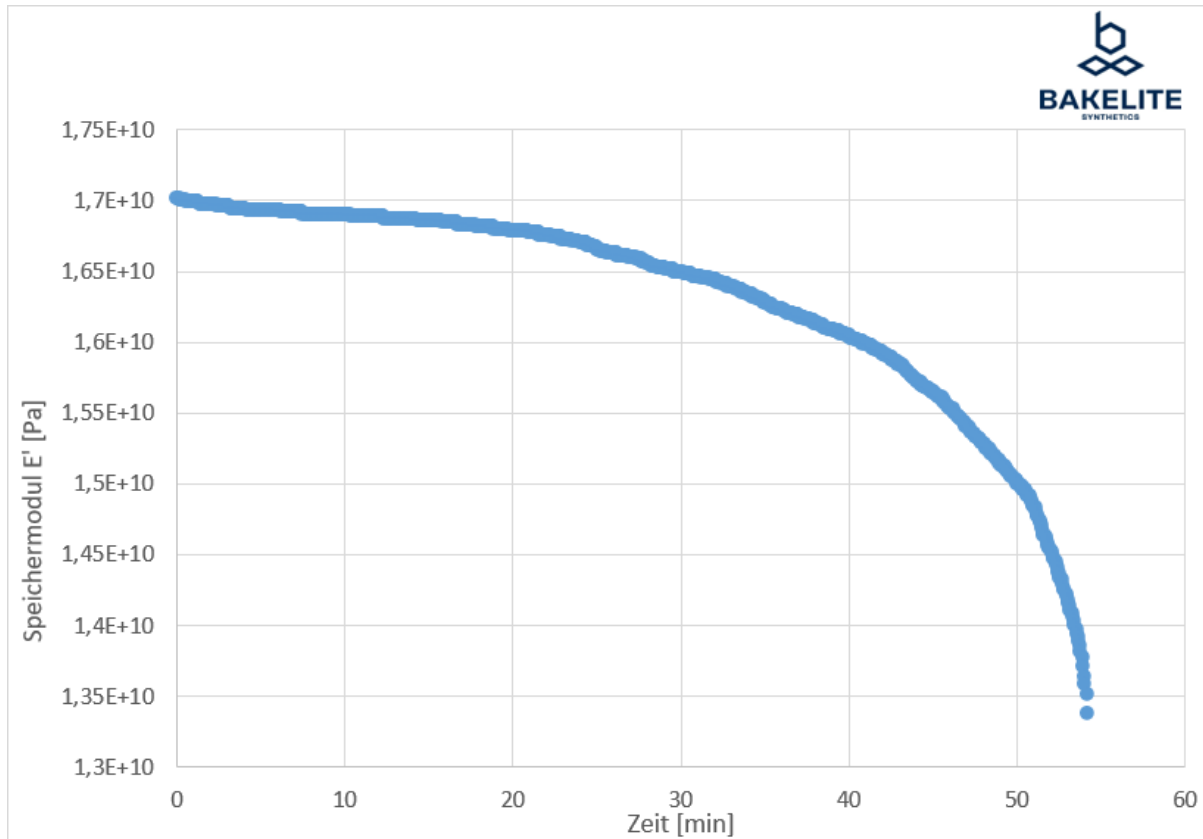


Abbildung 2.21 Verlauf des Speichermoduls bei einsetzendem Bruch mit Bakelite® PF1110-9005-S2

Reproduktionsmessungen konnte innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr vollumfänglich durchgeführt werden. Eine Übertragung dieses Messmethodik auf hybride Proben stand zum Projektende aus.

2.5 AP8: Recycling

Angewandte Ansätze sowie aktuelle Forschungen und Entwicklung zum Thema Recycling von duroplastischen Werkstoffen wurden im Rahmen einer Patent- und Literaturrecherche aufgearbeitet. Alle Recyclingansätze zeigen Vor- und Nachteile. Technisch betrachtet werden duroplastische Formmassen nicht vollständig ausgehärtet. Die verbleibende Restreaktivität könnte im Falle der mechanischen Aufarbeitung zusätzlich ausgenutzt werden, da an den Grenzflächen des Rezyklats neue Bindungen mit der umgebenden Polymermatrix entstehen können. Dieses Konzept wurde im Rahmen von grundlegenden Laborversuchen im Rahmen der Bakelite® PF1110-9005-S2-Formulierung untersucht. Dazu wurden Formteile der genannten Sorte im Pressverfahren erstellt und im Anschluss im Labormaßstab mechanisch zu Rezyklat aufbereitet (siehe Abbildung 2.22).

Abschlussbericht DuroHyb

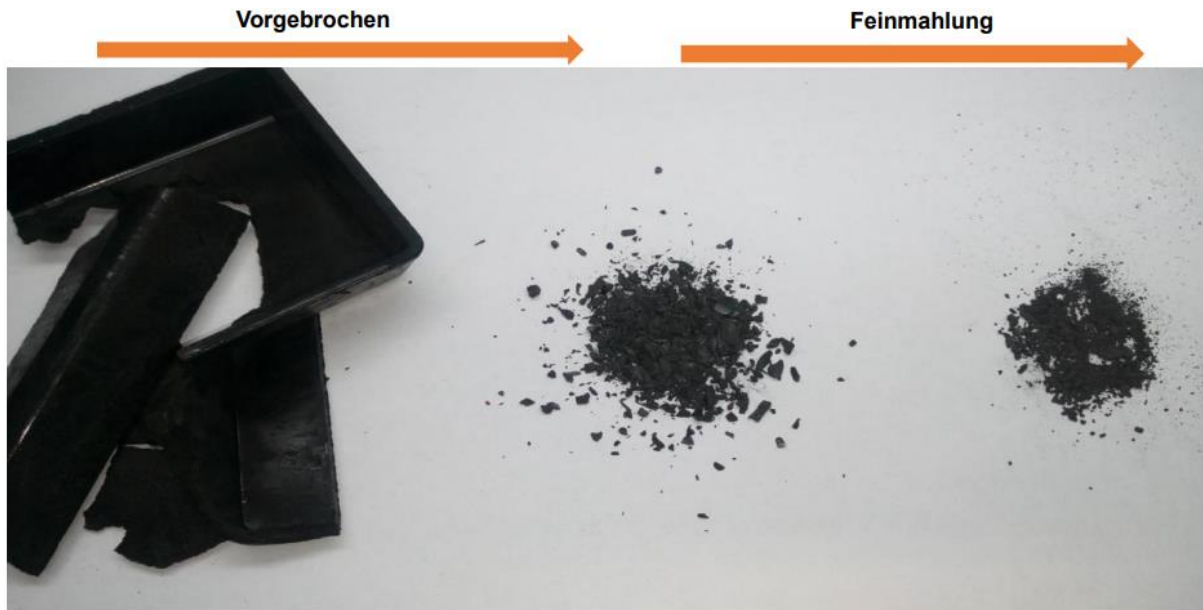


Abbildung 2.22 Aufarbeitungsschritte der Formteile zu Rezyklat

Die hohe Abrasivität, speziell von hoch anorganisch gefüllten Polymeren, konnte bestätigt werden. Die Schermesser der eingesetzten Mühle waren bereits nach ca. 200g Mahlgut verschlissen (siehe Abbildung 2.23). Anzumerken sei, dass es sich nicht um eine spezielle, für dieses Mahlgut ausgelegte, Mühle hinsichtlich Mahlwerkzeug handelte.



Abbildung 2.23 Verschleiß der Labormühle (links Ausgangszustand, rechts nach Aufmahlung)

Das resultierende Kornspektrum lag im Bereich von $>1000\mu\text{m}$ - $> 0\mu\text{m}$ (siehe Abbildung 2.24). Im Gegensatz zu einem industriell / großtechnisch erstellten Formmassenrezyklats zeigt das im Labormaßstab erstellte Rezyklat eine breitere und gröbere Kornverteilung (vgl. Abbildung 2.24 mit Abbildung 2.25).

Abschlussbericht DuroHyb

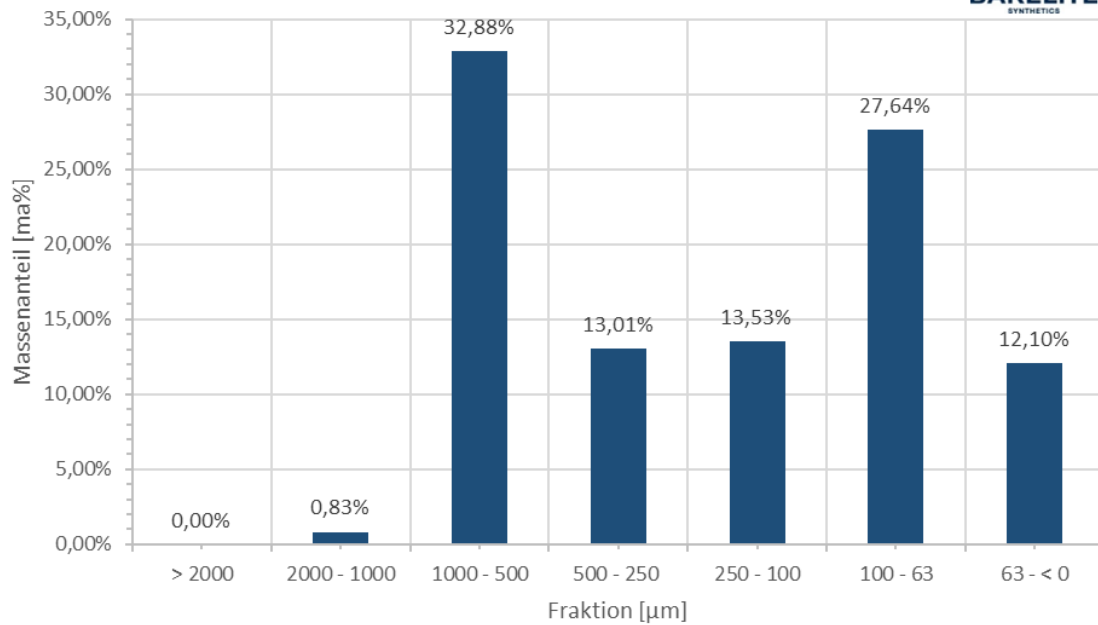


Abbildung 2.24 Kornspektrum des Laborrezyklats

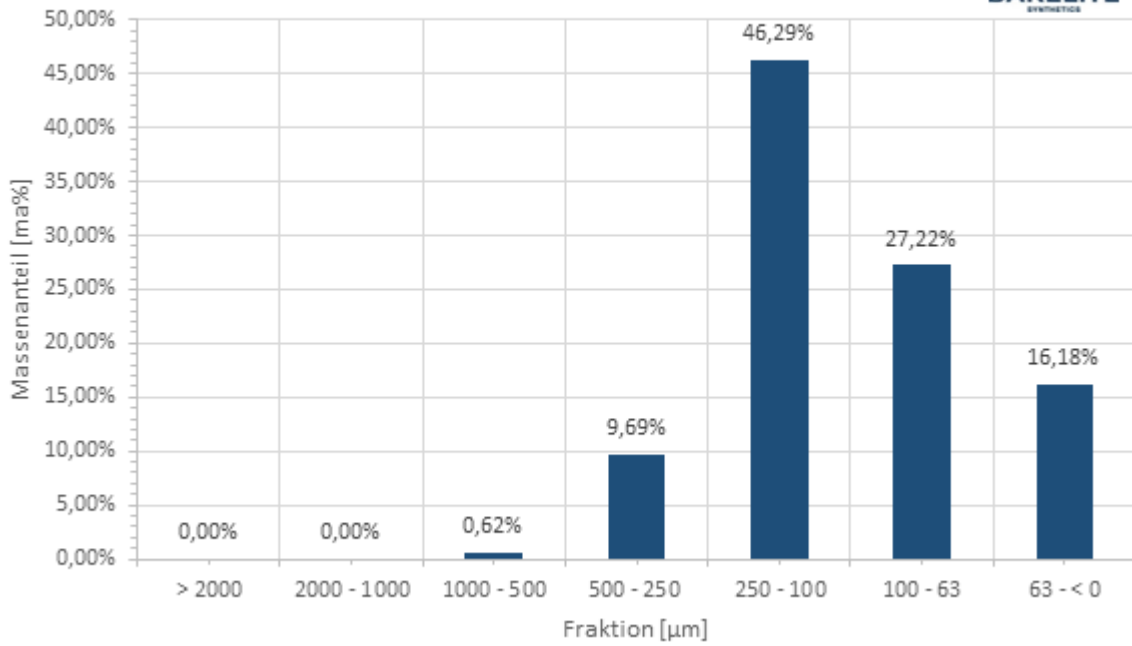


Abbildung 2.25 Großtechnisch hergestelltes Rezyklat

Abschlussbericht DuroHyb

Die Versuche zeigten, dass ca. 50% der Verstärkungsstoffe der Bakelite® PF1110-9005-S2 mit einem Rezyklat nach Abbildung 2.24 ausgetauscht werden können, bis die Grenzen der Compoundierfähigkeit erreicht werden. 50% Austausch der Füllstoffe bedeuten einen Rezyklatanteil von 40% in der Gesamt Rezeptur. Final wurde im Labormaßstab eine Bakelite® PF1110-9005-S2-Rezeptur mit 50% Austausch der Füllstoffe gegen sortenreines, ebenfalls im Labormaßstab erstelltes, Bakelite® PF1110-9005-S2 compoundiert (Laborbezeichnung LPF2217). Zur Vergleichbarkeit wurde ebenfalls im Labormaßstab Bakelite® PF1110-9005-S2 (Standard, ohne Rezyklat) compoundiert. Die Fließ- und Härtingscharakteristik wurden jeweils per Messkneteter bestimmt. Die Details der Messknetetermessung sind in DIN 53764 näher beschrieben. Der Vergleich der Fließ- und Härtingscharakteristik zeigte eine erhöhte Viskosität und eine höhere Reaktivität der LPF2217 gegenüber der Bakelite® PF1110-9005-S2. Durch die Reduktion von fließfähigeren Verstärkungsstoffen gegenüber weniger gut fließfähigem Rezyklat steigt die Viskosität und durch das Rezyklat zusätzlich eingebrachten (unverbrauchten) Katalysator steigt die Reaktivität. Das erhaltene Formmassengranulat wurde vorplastifiziert und im Pressverfahren zu 4mm Flachplatten verpresst. Ein Unterschied in der Oberflächenqualität der beiden Formmassen konnte festgestellt werden (siehe Abbildung 2.26).

Abschlussbericht DuroHyb

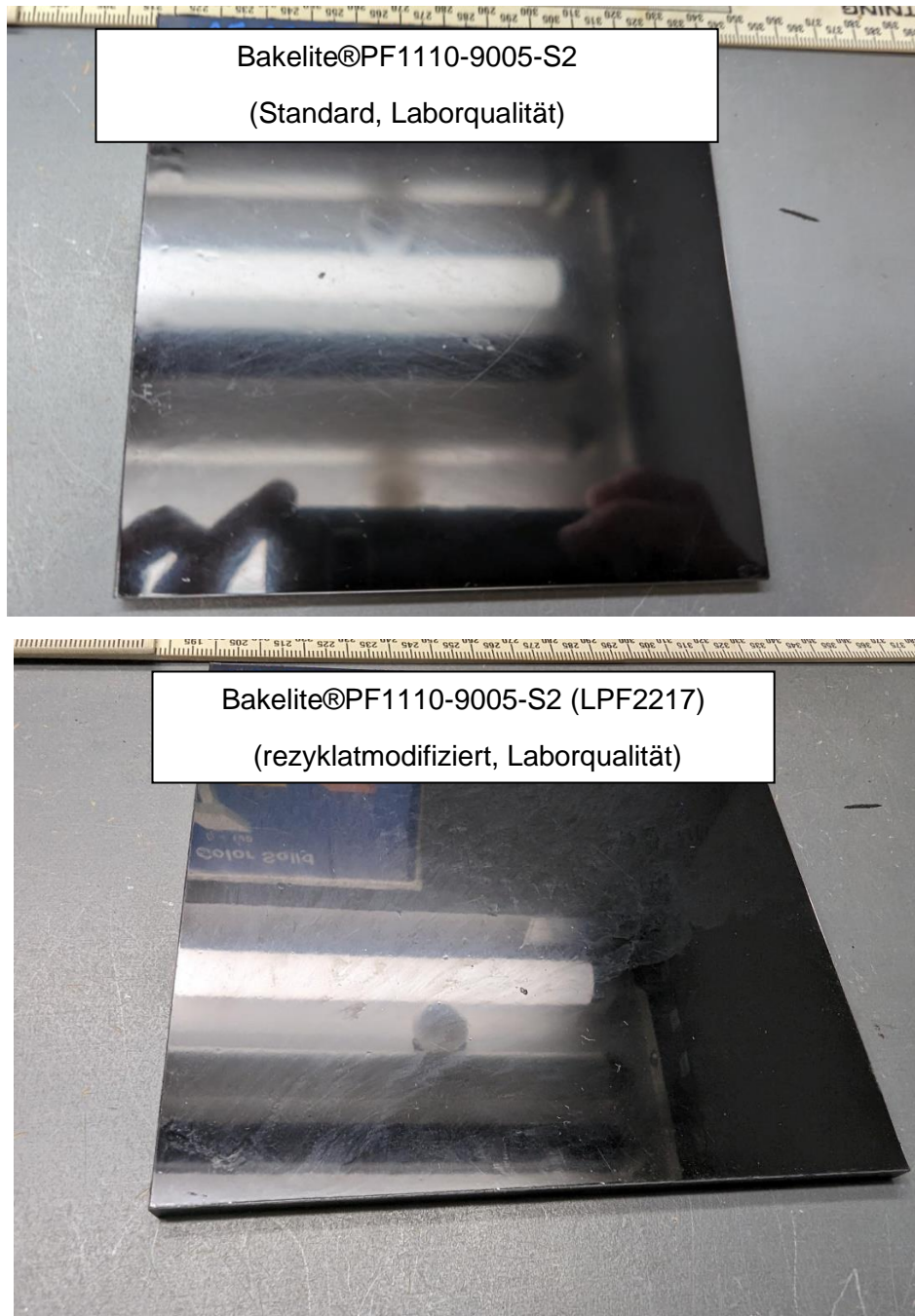


Abbildung 2.26 Vergleiche der Oberflächenqualitäten von Standard und rezyklatmodifizierten Bakelite® PF1110-9005-S2

Aus diesen Flachplatten wurden Probekörper präpariert und die Festigkeit per Biegeversuch bestimmt. Bakelite® PF1110-9005-S2 (Laborqualität) stellt die maximal erreichbare Biegefestigkeit (100%) dar, LPF2217 wird relativ dazu in betrachtet. Im Vergleich zeigt LPF2217 eine 20%ige Abnahme der Biegefestigkeit und ein um 30% abgenommenes Biege-E-Modul (siehe Abbildung 2.27).

Abschlussbericht DuroHyb

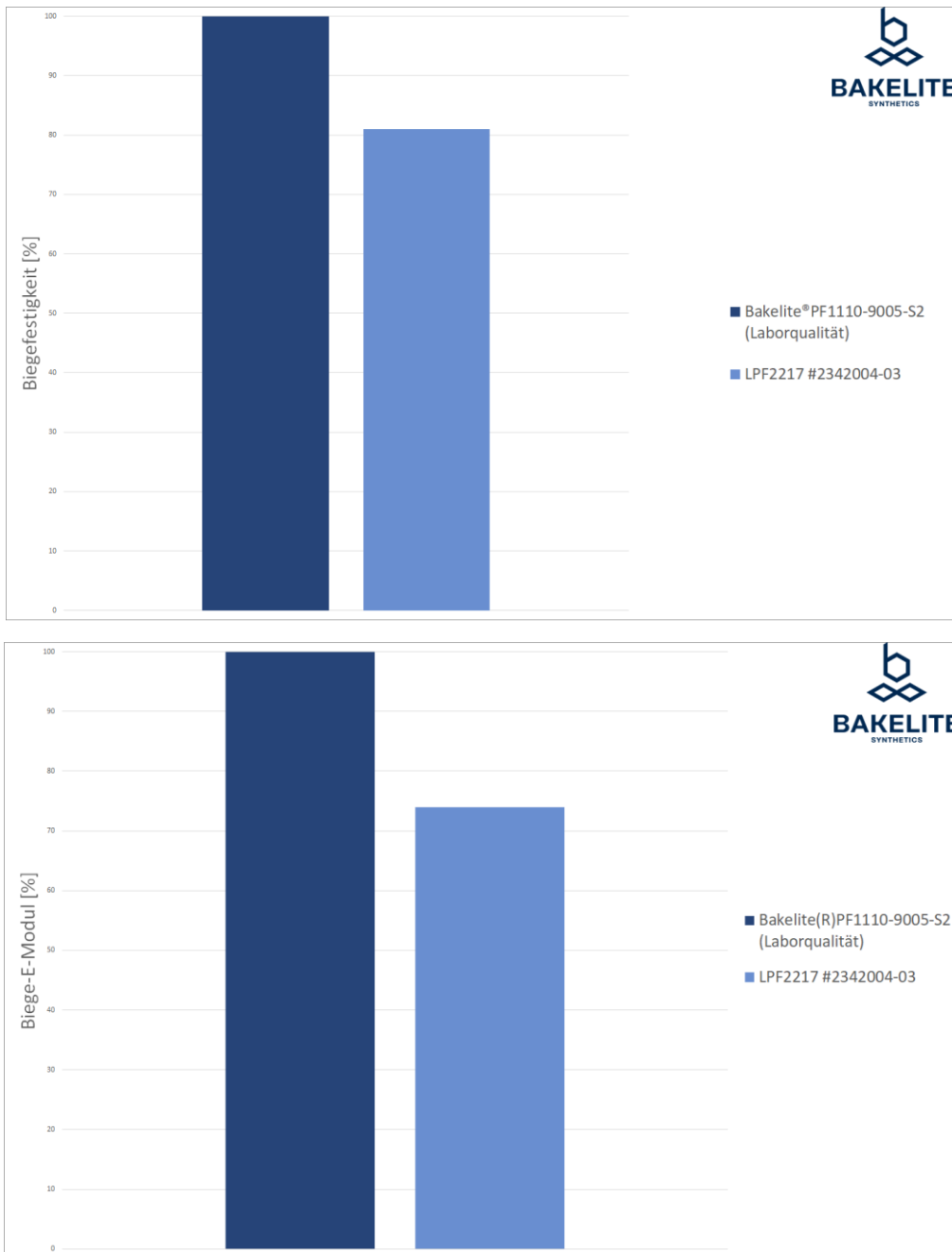


Abbildung 2.27 Biege-E-Modul und Biegefestigkeiten von Bakelite® PF1110-9005-S2 und LPF221 (jeweils Laborqualität)

Die Versuche zeigten am Beispiel der Bakelite® PF1110-9005-S2, dass auf Kosten der Festigkeit und Oberflächenqualität ein signifikanter Austausch an Rezyklat, möglich ist. Für ein kommerzielles Szenario einer solchen rezyklatmodifizierten Formmasse bedarf es weiterer Untersuchungen und Datenerhebungen.

Abschlussbericht DuroHyb

2.6 Zusammenfassung

Alle wirtschaftlichen und technischen Anforderungen an Materialien, Bauteile und Prozesse wurden erarbeitet und definiert. Aufgrund der Bauteilanforderungen und dem daraus entwickelten Lastenheft wurden in einer Fähigkeitsbetrachtung die von der Firma Bakelite bereitgestellten Formmassen Bakelite® PF 1110-9005-S2, PF 6510-9005-S1, PF 6680-9005-S1, EP 8111-9005-P1 sowie EP 8412-9005-S6 bewertet. Im Projektkonsortium wurde entschieden, zunächst die beiden Produkte mit den höchsten Steifigkeiten in die nähere Begutachtung zu ziehen. Dies sind die Produkte Bakelite® PF1110-9005-S2 und Bakelite® EP8111-9005-P1. Als zusätzliche Motivation zur Wahl dieser beiden Sorten ist die hohe Verfügbarkeit der Materialdaten zu nennen. Zur Bewertung der Adhäsion der genannten Formmassen auf Metalloberflächen wurde eine Methode erarbeitet, bei welcher ein Metallstempel aus denen im Projekt betrachteten Legierungen und Formmassen verpresst und im Rahmen einer axialen Zugbelastung bis zum Bruch belastet wurde. Die resultierende Bruchkraft stellt ein Maß der Adhäsion dar. Die Probenvorbereitung stellte sich als zeitaufwändig und nicht gut reproduzierbar dar. Eine Alternative zu dem beschriebenen Verfahren wurde erarbeitet bei dem die Prüfkammer eines Rubber Capillary Rheometer (RCR) modifiziert wurde, sodass dieses als Presse arbeitet. Diese Methode erwies sich als robuster und schneller hinsichtlich Probenpräparation. Die besten Ergebnisse hinsichtlich initialer Adhäsion konnte mit Bakelite® PF1110-9005-S2 und Bakelite® EP8111-9005-P1 auf 16MnCr5 erzielt werden, wenn gleich dieser Haftverbund als technisch nicht ausreichend bewertet wurde. Ein besserer Haftverbund konnte hinsichtlich Bakelite® EP8111-9005-P1 auf 16MnCr5 mit einer Zn-Phosphatierung sowohl mit als auch ohne Passivierung reproduzierbar erzielt werden. Die besten Ergebnisse hinsichtlich Bakelite® PF1110-9005-S2 konnten auf 16MnCr5 mit einer Mn- / ZnCa-Phosphatierung festgestellt werden. Laserstrukturierte Oberflächen wurden nicht im Rahmen der genannten Pressversuche bei Bakelite bewertet. Im Rahmen des Projektkonsortiums wurde sich zusätzlich auf die Entwicklung eines chemischen Haftvermittlers als mögliche Alternative geeinigt. Die Entwicklung des Haftvermittlers wurde auf Basis einer Epoxydharzabmischung durchgeführt. Verschiedene Applikationen (rieselfähig und in Lösemittel gelöst) wurden hinsichtlich der Haftvermittlung zwischen Bakelite® EP8111-9005-P1 sowie Bakelite® PF1110-9005-S2 auf 16MnCr5 getestet. Hinsichtlich Bakelite® EP8111-9005-P1 konnte ein zufriedenstellender Haftverbund beobachtet werden bzgl. Bakelite® PF1110-9005-S2 war das Ergebnis schwankend. Im Verlauf des Projektes zeigte jedoch die Laserstrukturierung das bessere und reproduzierbarere Ergebnis. Eine Methodenentwicklung zur Beurteilung der Dauerfestigkeit der Grenzfläche eines hybriden Bauteils wurde durchgeführt. Erwartete Kurvenverläufe zur Abnahme der erreichbaren Lastwechsel bei Erhöhung der Spannung konnten hinsichtlich Bakelite® PF1110-9005-S2 beobachtet werden. Eine Übertragung dieser Methodik auf hybride Probekörper geschah im Rahmen des Projektes nicht mehr. Zur Bewertung der Reaktionsschwindung wurde ein Konzept eines modifizierten RCR (Rubber Capillary Rheometer) untersucht. Nach der Bewertung von Materialien mit eindeutig zuzuordnenden Verläufen wurden im Anschluss Formmassen untersucht. Die erwarteten Kurvenverläufe zur Schwindung konnten qualitativ festgestellt werden der zeitliche Verlauf ist jedoch unerwartet lang. Eine abschließende Bewertung zur Prüfmittelfähigkeit konnte nicht mehr erstellt werden. Temperprogramme zur Maximierung des Schrumpfes und damit Flächenpressung zur Intensivierung des Haftverbundes durch maximale Schwindung wurden per TMA (Thermomechanische Analyse) analysiert. Ein Kriterium zur Maximierung der Schwindung ist das Nichtüberschreiten des aktuellen Glasübergangspunktes während des Temperns. Ein optimales Temperprogramm zur Maximierung der Schwindung wurde auf Basis der durchgeführten Analysen empfohlen. Auf des von Kamal und Sourour entwickelten Kinetikansatzes für Duroplasten wurde mit Hilfe der Kinetik Software NeoKinetic der Fa. Netzsch ein kinetisches Modell der Härtung von Bakelite® EP8111-9005-P1 und Bakelite® PF1110-9005-S2 auf Basis von DSC-Daten erstellt. Das Kinetikmodell der

Abschlussbericht DuroHyb

Bakelite® EP8111-9005-P1 konnte auf eine Abweichung hinsichtlich errechneten (simulierten) und per DSC analysierten Aushärtungsgrad von ca. 1,5% bestimmt werden. Angewandte Ansätze sowie aktuelle Forschungen und Entwicklung zum Thema Recycling von duroplastischen Werkstoffen wurden im Rahmen einer Patent- und Literaturrecherche aufgearbeitet. Die Möglichkeit Restreaktivitäten eines duroplastischen Rezyklates auszunutzen, macht die Einarbeitung des Rezyklats als reaktiven Füllstoff möglich. Versuche im Labormaßstab zeigten am Beispiel der Bakelite® PF1110-9005-S2 Rezeptur, dass bis zu 50% der Ausgangsfüllstoffe durch Rezyklat ersetzt werden können, bis die Grenze der Compoundierfähigkeit erreicht ist. Gegenüber der Ausgangsrezeptur zeigte die rezyklatmodifizierte Variante eine etwas schlechtere Oberflächenqualität und verringerte mechanische Eigenschaften.

2.7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

- Kinetik Software NeoKinetic der Firma Netzsch.

2.8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.

Vertiefte Einarbeitung und Aufbau von Wissen zum Adhäsionsverhalten und Entwicklung entsprechender Prüf- und Analysemethoden stellten den größten Anteil der geleisteten Arbeiten im Rahmen des Projektes für Bakelite dar. Ohne die Zusammenarbeit im Projektverbund und dem regelmäßigen Wissensaustausch der Projektpartner sowie der finanziellen Förderung wären die erzielten Ergebnisse für Bakelite, in diesem Umfang und Detailtiefe, nicht möglich gewesen.

2.9 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses

Durch den Aufbau von Materialverständnis zum Adhäsionsvermögen und der Identifizierung der Laserstrukturierung als erwiesene Möglichkeit den Haftverbund zwischen Metallsubstraten und den betrachteten Formmassen zu gewährleisten sind weitere Anwendungsfälle bzw. hybride Bauteillösungen denkbar. Des Weiteren liefern die entwickelten Charakterisierungsmethoden die Möglichkeit neue Formmassen, mit dem Hintergrund einer gewollten Adhäsion, zielgerichteter entwickeln und auf ein mögliches Anwendungsszenario abstimmen zu können.

2.10 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen.

Nicht bekannt.

Abschlussbericht DuroHyb

2.11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse nach Nr. 5 der NABF und NKBF.

Lfd. Nr.	Autoren	Titel	Journal, Volume, Issue, Page	Datum	Sonstiges
1	Axel Brenzinger, Jens Gennath	Hybride Rotorwelle für einen E-Motor Bauteilentwicklung im Einklang mit der Materialentwicklung	11. Internationale Duroplasttagung Iserlohn	24.11.2021	
2	Roland Schwarz, Axel Brenzinger, Dr. Thomas Löhl, Jens Gennath	Hybridrotorwelle im Elektromotor – Bauteil- und Werkstoffentwicklung im Einklang	Technomer 2021 - 27. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren	04.-05.11.2021	

3 Teil III - Erfolgskontrollbericht Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

3.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Durch die erhaltenen Ergebnisse und Erfahrungen ist ein tieferes Verständnis zur Anwendung und Realisierung sowie der effizienten Herstellung von hybrider Werkstoffverbunden entstanden, die der Öffentlichkeit nun zur Verfügung stehen und auf dessen Basis weitere Entwicklungen durchgeführt werden können.

3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen.

Werkstoffverbunde aus duroplastischen Formmassen auf Phenolharz- oder Epoxydharzbasis sind möglich, sofern die Oberflächenstrukturierung und Aufbereitung (Reinigung) der Grenzfläche materialgerecht durchgeführt wird. Versuche dazu zeigten, dass auf den betrachteten Metalloberflächen im unbehandelten und unstrukturierten Zustand kein ausreichender bzw. schwankender Haftverbund erzielt werden konnte. Versuche mit einem auf epoxydharzbasierenden Haftvermittler lassen jedoch die Aussage zu, dass durch eine Materialanpassungen, hinsichtlich Bindemittelsystem, ggf. auch Haftverbunde im unstrukturierten Zustand erzielt werden können.

3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans.

3.3.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Bakelite hat keine Schutzrechtsanmeldungen angemeldet.

3.3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Das Projekt demonstrierte die prinzipielle Machbarkeit technisch anspruchsvoller hybrider Werkstoffverbunde unter der Verwendung von duroplastischen Formmassen auf Phenolharz- oder Epoxydharzbasis. Für einen kommerziellen Erfolg bedarf es jedoch noch der Erhebung weiterer Werkstoffkennwerte und Charakterisierungen des Haftverbundes. Es bleibt bei der im Langantrag formulierten Einschätzung, dass in ca. 1-3 Jahren nach Abschluss des Projektes mit einem kommerziellen Erfolg gerechnet werden könnte.

3.3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Der technische Erfolg konnte bereits an den gefertigten Demonstratoren während des Projektes dargestellt werden.

Abschlussbericht DuroHyb

3.3.4 Tabellarische Zusammenfassung

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Zeithorizont
1	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	Während der Projektlaufzeit
2	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	1- 3 Jahre nach Projektende

3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse

Die Anschlussfähigkeit liegt in der weiteren Erhebung von Materialkennndaten und der weiteren Charakterisierung des Haftverbundes. Dazu kann an die Ergebnisse hinsichtlich der beschriebenen Methodenentwicklungen angeknüpft werden.

3.5 Arbeiten die zu keiner Lösung geführt haben

Die Methodenentwicklung zur Beschreibung der Dauerfestigkeit und der Reaktionsschwindigkeit konnten innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr vollständig abgeschlossen werden.

3.6 Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und der Zeitplanung. Abweichungen sind kurz zu begründen (bspw. bei vermindertem Mittelabruf).

Aufgrund der Covid-Problematik konnten Labore und Analysengeräte nicht in dem Umfang genutzt werden wie Anfangs geplant. Nach Absprache mit dem Projektträger wurde die Laufzeit verlängert. Im Jahr 2021 mussten die zur Verfügung stehenden personellen Ressourcen. Angepasst werden. Entsprechend vermindert fiel der Mittelabruf aus.