Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

1, TU Braunschweig, Insitut für Füge- und Schweißtechnik

2, Bauhaus-Universität Weimar, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau

zu dem über die

im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16.956 B / DVS-Nr. 08.072**

Applikation und Einsatz von faserverstärkten Klebstoffen im Bauwesen (FibrAdh)

(Bewilligungszeitraum: 01.02.2011 - 30.06.2013))

der AiF-Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS

Technische Universität Braunschweig
Institut für Füge- und Schweißtechnik
Langer Kamp 8 D-38106 Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger

Braunschweig, 28. 10. 2013
Ort, Datum

Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger

Weimar, 30. 10. 2013
Ort, Datum

Bauhaus-Universität Weimar,
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Professur Stahlbau
Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Werner

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis III
Tabellenverzeichnis V
1 Zusammenfassung 6
2 Einleitung 7
3 Stand der Forschung und Technik 8
3.1 Verarbeitung hochviskoser faserverstärkter Kunststoffe 8
3.2 Rührwerke zur Klebstoffherstellung, -verarbeitung und -bereitstellung 11
3.3 Verarbeitung und Mischen von 2K-Klebstoffen 12
3.4 Viskositätsproblematik und Faserschädigung 18
4 Problemstellung und Zielsetzung 19
4.1 Methodischer Ansatz zur Erreichung des Forschungsziels 19
4.2 Anmerkungen zur Vorgehensweise 21
5 Durchführung und Ergebnisse 22
5.1 Werkstoffauswahl 22
5.1.1 Auswahl der Versuchsklebstoffe und Fasern 22
5.1.2 Ermittlung möglicher Klebstoff-Faser-Kombinationen 23
5.2 Mechanische und analytische Methoden 25
5.2.1 Quasistatische Zug- bzw. Zug-Scherversuche 25
5.2.2 Rheologie 26
5.2.3 Mikrofokus-Computertomografie (µCT). 30
5.2.4 Mikroskopie 31
5.3 Basisuntersuchungen zur Rheologie und zum Verarbeitungspotential der betrachteten Klebstoffe 33
5.4 Mechanische Charakterisierung der modifizierten Klebstoffe 36
5.4.1 Ermittlung von Zugfestigkeit und E-Modul 36
5.4.2 Zug-Scher-Festigkeiten 38
5.5 Bruchflächenanalyse und Identifizierung der Klebstoffmatrix 40
5.5.1 Optimierungspotential durch Variation von Klebstoffen und Fasern 40
5.5.2 Bruchflächenanalyse der Zugversuche 40
5.5.3 Homogenisierungsfehler 44
5.6 Entwicklung einer Misch- und Applikationseinheit und einer Prozesskette 46
5.6.1 Pumpversuche 46
5.6.2 Schädigungen von Klebstoff und Faser 47
5.6.3 Schädigungen der Anlagentechnik 49

5.6.4 Optimierung der Prozesstechnik 50
5.7 Anwendungsorientierter Technologieeinsatz 51
5.7.1 Praxisnahe Anwendung 51
5.7.2 Untersuchungen an Aluminium-Eckprofilen 52
5.7.3 Auswertung der Belastungstest 54
5.7.4 Numerische Untersuchungen an den Aluminiumprofilen 57
6 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse 58
7 Wirtschaftliche Bedeutung der Ergebnisse 61
8 Plan zum Ergebnistransfer und Umsetzung der Ergebnisse in die Wirtschaft 61
9 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 63
10 Literaturverzeichnis 63
11 Durchführende Forschungsstellen 65
12 Danksagung 65

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typischer Aufbau einer Kunststoffspritzgießanlage [Bos2004] 8
Abbildung 2: Direktverarbeitung von Langfasergranulaten in einer Spritzgießmaschine mit Extruder [Bür2003].....9
Abbildung 3: Getrennte Zugabe von Glasfasern und Kunststoff in eine Spritzgießcompoundmaschine mit Doppelschneckenextruder [Bür2003; Ber2009].....9
Abbildung 4: Schneckentypen zur Homogenisierung von Polymerschmelzen [Hen1989] 10
Abbildung 5: Statische Metallmischer zur Homogenisierung von Polymerschmelzen [Joh2001, Sul2008] 10
Abbildung 6: Mischkopf mit statischem Mischer (links) und dynamischem Mischer (rechts) zur Homogenisierung von Polymerschmelzen [Sul2006].....11
Abbildung 7: Vakuum-Planetenrührwerk und eine Darstellung gebräuchlicher Rührertypen [Her2008, Zlo1999].....12
Abbildung 8: 2K-Klebstoffanlage mit Zahnraddosierpumpen [Hil2009] 13
Abbildung 9: Fassversorgungspumpe(links), Fassversorgungspumpe mit Exzenterschneckenpumpe und Druckbehälter mit Rührwerk (rechts) [Hil2009, Vis2009].....13
Abbildung 10: Vergleich von Handauftragseinheit mit statischem Mischer (links) und statischer Mischkopf mit zwei Exzenterschneckenpumpen (rechts) [Hil2009, Vis2009].....14
Abbildung 11: Aufbau eines statischen Mischrohres [Hab2006] 15
Abbildung 12: Unterschiedliche statische Mischrohre 15
Abbildung 13: Statisch-Dynamischer Mischer [Hil2009].....16
Abbildung 14: Dynamikmischer [End1990].....16
Abbildung 15: Dynamikeinwegmischer.....17
Abbildung 16: 2K-Handpistole Dow Betagun® III, Dow Chemical Company 17
Abbildung 17: Faserarten von links nach rechts: Kohlenstofffasern, Glasfasern, Aramidfasern. Die gezeigten Mengen entsprechen einem vergleichbaren Gewicht.....23
Abbildung 18: Zugprobe nach DIN EN ISO 527-4 25
Abbildung 19: Zug-Scher-Proben gemäß DIN EN 1465.....25
Abbildung 20: EasyTest EZ20 Prüfmaschine mit externer Wegaufnahme.....26
Abbildung 21: Kinexus Rheometer der Firma Malvern Instruments Ltd 27
Abbildung 22: Frequenzsweep von Klebstoff 1 mit Kohlenstofffaseranteilen 28
Abbildung 23: Gültigkeit der Cox-Merx-Regel 29
Abbildung 24: Amplitudentest als Schubspannungsfunktion, mit der Nachgebgrenze τ_y und der Fließgrenze τ_f [Mez2010].....29
Abbildung 25: Bestimmung der Nachgebgrenze und der Fließgrenze anhand von Klebstoff 2 30
Abbildung 26: v|tome|x s der Firma GE Sensing & Inspection Technologies GmbH..31
Abbildung 27: Binokulares Stereomikroskop Stemi 2000 c der Firma Zeiss 31
Abbildung 28: Rasterelektronenmikroskop JSM 6480 der Firma JEOL 32
Abbildung 29: Zugfestigkeit und E-Modul von Klebstoff 1 36

Abbildung 30: Zugfestigkeit und E-Modul von Klebstoff 2 36
Abbildung 31: Zugfestigkeit von Klebstoff 2 mit Glasfasern (GF) und Aramidfasern (AF) 37
Abbildung 32: Spannungs-Zeit Verlaufskurve der Zugproben von Klebstoff 3 38
Abbildung 33: Zug-Scher-Versuchsproben vor (links) und nach (rechts) der Prüfung 38
Abbildung 34: links: Ergebnis einer numerische Analyse der Kraftübertragung zwischen Klebstoff und Fasermaterial - Auswertung der Schubspannungen τ in [N/mm²]; rechts: Aufnahmen des Zustandes der Faser-Klebstoffmatrix nach einem Bruch im Zugversuch 40
Abbildung 35: Bruchbilder nach Zugprüfungen an Klebstoff 2 mit unterschiedlichen Anteilen an Kohlenstofffasern (CF) 41
Abbildung 36: Bruchbilder nach Zugprüfungen an Klebstoff 2 mit unterschiedlichen Anteilen an Glasfasern (GF) 42
Abbildung 37: Bruchbilder nach Zugprüfungen an Klebstoff 2 mit unterschiedlichen Anteilen an Aramidfasern (AF) 42
Abbildung 38: REM Aufnahmen von Klebstoff 2 mit Glasfasern 43
Abbildung 39: REM Aufnahmen von Klebstoff 2 mit 1% Aramidfasern 43
Abbildung 40: REM Aufnahmen von Klebstoff 2 mit 2% Aramidfasern 44
Abbildung 41: REM Aufnahmen von Klebstoff 2 mit 4% Kohlenstofffasern 44
Abbildung 42: Fehlstellenbildung bei der Herstellung der fvKs, 1-3: Luftporen, 4: Nestbildung, 5: nicht aufgebrochene Faserbündel 45
Abbildung 43: Pumpe des Typs Visco Star 20, Reinhardt Technik GmbH 46
Abbildung 44: Klebstoff 3, Faserschädigung nach Pumpversuch, µ-CT-Aufnahme 47
Abbildung 45: Klebstoff 3, nach der Dosierung durch eine 2mm Öffnung, µ-CT Aufnahme 48
Abbildung 46: Klebstoff 2 mit 5% Glasfaseranteil, nach der Dosierung durch eine 2mm Öffnung, µ-CT-Aufnahme 48
Abbildung 47: 2K-Doppelkartusche mit Statikmischrohr 50
Abbildung 48: Klebung von Profilecken (links), geklebte Profilecken (rechts) 51
Abbildung 49: Klebstoff 3, Ausrichtung der Fasern in Applikationsrichtung, µ-CT-Aufnahme 52
Abbildung 50: Abmessung der verwendeten Aluminiumecken 53
Abbildung 51: Drei Versuchsreihen der Aluminiumecken mit den dazugehörigen Belastungssituationen 53
Abbildung 52: Klimazyklus nach DIN EN ISO 9142 [DIN9142] 54
Abbildung 53: Auszug aus den Belastungskurven für Versuchsreihe 1 mit 25 mm Aluminiumquerschnitt nach Klimalagerung (blau 0%KF; rot 2%KF; grün 3%KF) 55
Abbildung 54: verschiedene Bruchflächen der belasteten Aluminiumecken 57
Abbildung 55: Simulierte Spannungen an belasteter Aluminiumecke 57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe (laut Datenblatt) 22
Tabelle 2: Eingesetzte Fasern (Langfasertypen ≥ 3mm) 23
Tabelle 3: Durchgeführte Modifikationen an Klebstoff 2 23
Tabelle 4: Einfluss des Kohlenstofffaseranteils (CF) in Klebstoff 1 (KS1) 33
Tabelle 5: Einfluss des Kohlenstofffaseranteils (CF) in Klebstoff 2 (KS2) 34
Tabelle 6: Einfluss des Glasfaseranteils (GF) in Klebstoff 2 (KS2) 34
Tabelle 7: Einfluss des Aramidfaseranteils (AF) in Klebstoff 2 (KS2) 35
Tabelle 8: Einfluss des Glasfaseranteils in Klebstoff 3 35
Tabelle 9: Fördermengen der Visko Star 20 46
Tabelle 10: Mittlere Druckkräfte aus Versuchsreihe 1 [kN] 55
Tabelle 11: Mittlere Zugkräfte aus Versuchsreihe 2 [kN] 56
Tabelle 12: Mittlere Druckkräfte aus Versuchsreihe 3 [kN] 56
Tabelle 13: Bereits erfolgte Transfermaßnahmen 61
Tabelle 14: Geplante Transfermaßnahmen 62

1 Zusammenfassung

Der Einsatz von zweikomponentigen faserverstärkten Klebstoffen (2K-fvK) ist für viele industrielle Anwendungen von großem Interesse. Das Einbringen von Fasern in strukturelle Klebstoffe sorgt für ein spezielles Eigenschaftsprofil, bei dem sowohl die Standfestigkeit des nicht ausgehärteten Klebstoffs als auch die Kohäsions- und Dauerfestigkeit erhöht werden. Faserverstärkte Klebstoffe zeigen eine im Vergleich zu den nicht modifizierten Typen höhere Schadenstoleranz und eine erhöhte Energieaufnahme bis zum Bruch. Innerhalb des Forschungsprojektes „*Applikation und Einsatz von faserverstärkten Klebstoffen im Bauwesen - FibrAdh*“ sollten Grundlagen des rheologischen und mechanischen Verhaltens von 2K-fvKs erarbeitet werden. Die 2K-fvKs sollten mit Hilfe der erhaltenen Erkenntnisse gezielt optimiert werden können, um diese neue und innovative Werkstoffklasse anforderungsnah für den Anwendermarkt formulieren zu können. Für eine optimale Anwendung in der Industrie waren dafür Prozessparameter und die grundsätzliche Verarbeitbarkeit zu untersuchen. Mit diesen Ergebnissen war eine effektive Verarbeitungsprozesskette zu entwickeln bzw. vorhandene Anlagentechnik auf ihre Eignung zu prüfen.

Bezug nehmend auf vorrangegangene Forschungsprojekte fiel die Auswahl auf drei 2K-Epoxidharz-Klebstoffsysteme. Bei der Auswahl der Faserarten zur Modifikation der bestehenden Klebstoffsysteme wurden Kohlenstofffasern (CF), Glasfasern (GF) und Aramidfasern (AF) im Langfaserbereich ≥ 3mm in Abstimmung mit dem PA ausgewählt. Zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit der unterschiedlichen Faser-Klebstoff Gemische wurden umfangreiche rheologische Untersuchungen durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass je nach Faserart ab einem bestimmten Füllgrad die Viskosität eine Größe erreicht, in der eine gleichmäßige Homogenisierung nicht mehr möglich ist. Zudem zeigte sich, dass die Zumischung der Fasern in die in der Regel niedrigviskosere Harzkomponente am sinnvollsten ist. Mikroskopisch und makroskopisch konnte an Bruchbildern gezeigt werden, dass Glasfaserbündel und auch Aramidfasern in den untersuchten Klebstoffen vielfach nicht aufbrechen und zur Nestbildung neigen. Die Notwendigkeit der Verwendung eines geeigneten Misch- und Fördersystems für die modifizierten Klebstoffe war damit deutlich zu beobachten. Bei Langzeitpumpversuchen musste jedoch festgestellt werden, dass die Anlagentechnik aufgrund der abrasiven Medien Verschleißerscheinungen aufwies. Für den längerfristigen Einsatz muss daher zukünftig die Oberflächenhärte des Förderraums dem Klebstoff angepasst werden. Als Alternative zur Förderpumpe besteht jedoch aufgrund der durchgeführten Versuche für kleinere Anwendungsfälle die Option, die Homogenisierung des 2K-fvK mittels Vakuummischer durchzuführen und anschließend die Applikation über Eurokartuschen zu realisieren. Bei der Evaluierung neuer Anwendungsfelder wurden so unter Verwendung von Klebstoff 2 in Kombination mit Kohlenstofffasern zahlreiche Aluminiumprofilecken hergestellt und mit eingeklebten Eckverstärkungsprofilen verglichen. Die prinzipielle Machbarkeit der Anwendung ist damit gegeben und die Basis für weitere Anwendungsfelder gelegt.

Das Ziel des Vorhabens wurde somit erreicht.

2 Einleitung

Der Einsatz von zweikomponentigen faserverstärkten Klebstoffen (2K-fvKs) mit einer Faserlänge ab 3mm ist für viele industrielle Anwendungen von großem Interesse, insbesondere im Bauwesen. Die Einsatzgebiete sind hier vor allem das Verbinden von Profilstrukturen (z.B. Hohlprofile, u.a. Alu-Fensterprofile) [Göb2009], das temporäre Verstärken/Bewehren geschädigter Beton- oder Mauerwerksstrukturen [Göb2009] und das strukturelle Verbinden von Bauteilen unter großen Toleranzen. Die Klasse der 2K-fvKs mit bis zu 20% Kurzglasfasern im Dickenbereich weniger Mikrometer findet vor allem auch Anwendung im Bereich von Windkraftanlagen [Bit2002]. Als weitere mögliche Einsatzfelder sind vor allem die Bereiche Luft- und Raumfahrt, Schienenfahrzeugbau und Schiffsbau zu nennen. Aufgrund der dort üblichen großen Strukturen kommt es zum Teil zu sehr großen Fügespalttoleranzen, die einem wachsenden Einsatz dieser Dickschichtstrukturklebungen große Marktchancen einräumen.

Das Einbringen von Fasern in strukturelle Klebstoffe sorgt für ein spezielles Eigenschaftsprofil, das diese Klebstoffklasse für die genannten Anwendungen besonders prädestiniert. Es werden sowohl die Standfestigkeit des nicht ausgehärteten Klebstoffs als auch die Kohäsions- und Dauerfestigkeit erhöht bzw. deutlich verbessert [Bit2002]. Darüber hinaus lässt sich das Schwindungsverhalten der Klebstoffe während der Aushärtung positiv beeinflussen.

Ein wachsendes Anwendungsvolumen dieser innovativen Klebstoffklasse wird gegenwärtig hauptsächlich durch Schwierigkeiten in der Verarbeitung verzögert. Die Fasern bewirken eine Viskositätserhöhung. Die hohe Viskosität erschwert das Mischen und Applizieren der einzelnen Klebstoffkomponenten. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass es ähnlich wie im Bereich der Verarbeitung von kurz- und langfaserverstärkten Kunststoffen an den einzusetzenden Maschinen zu abrasiven Verschleißschäden und lochfraßähnlichen Korrosionsangriffen kommen kann [Bra1980]. Während kurzfaserverstärkte Kunststoffe zur Herstellung von z. B. Spritzgussbauteilen häufig zum Einsatz kommen und die Verarbeitung dieser Kunststoffe dem Stand der Technik entspricht, sind bei der Verarbeitung im klebtechnischen Umfeld noch erhebliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig. Dies liegt zum einen darin begründet, dass bei der Kunststoffverarbeitung mit Kurzfasern meist thermoplastische Kunststoffe verarbeitet werden und somit vollkommen andere Verarbeitungsverfahren eingesetzt werden können als bei den Klebstoffen, die infolge der spezifischen Anforderungen zwangsläufig zweikomponentig zum Einsatz kommen müssen. Zum anderen besteht bei der stationären Kunststoffverarbeitung die Möglichkeit, Extruder einzusetzen, die mit den dort möglichen extrem großen Kräften und Drücken den Anwender in die Lage versetzen, diese hochviskosen Massen zu verarbeiten. Bei einer klebtechnischen Anwendung, die einen mobilen Einsatz voraussetzt, ist die Möglichkeit des Einsatzes eines Extuders nicht gegeben, so dass hier vollkommen neue Applikationsmöglichkeiten geschaffen werden bzw. die Klebstoffe so optimiert werden müssen, dass sie bei hinreichenden mechanischen Eigenschaften mit handhabbaren Verarbeitungsgeräten appliziert werden können. Beiträge zur Lösung der beschriebenen Problematiken liefert der vorliegende Bericht.

3 Stand der Forschung und Technik

Die Anzahl veröffentlichter Untersuchungen zum Thema „Faserverstärkte Klebstoffe“ ist sehr gering [BUW2008]. Insbesondere zur Thematik „Verarbeitung und Applikation“ konnten bisher außer den eigenen Arbeiten keine Darstellungen gefunden werden. Eine Vielzahl an Arbeiten und Veröffentlichungen existiert in dem themenverwandten Bereich der faserverstärkten Polymerverarbeitung, insbesondere zur Extrusion und zum Spritzguss. Dies wird im Folgenden dargestellt und dient sowohl der Abgrenzung der beiden Bereiche voneinander, als auch der Erklärung der im Projekt durchgeführten Forschungsarbeiten. Zusätzlich wird insbesondere der Stand der Technik der Verarbeitung von zweikomponentigen Klebstoffen dargestellt, da im Bauwesen diese Klebstoffklasse dominierend eingesetzt wird.

3.1 Verarbeitung hochviskoser faserverstärkter Kunststoffe

Bauteile aus thermoplastischen Kunststoffen werden in der Regel im Extrusions- oder Spritzgießverfahren hergestellt. In beiden Verfahren werden Schneckenförderer zum Aufschmelzen, Fördern und Mischen eingesetzt. Abbildung 1 zeigt den typischen Aufbau einer Extrusionsanlage. Die Kunststoffe kommen in Form von Granulat zum Einsatz. Die Verwendung von Granulat bietet die Möglichkeit, Kunststoffcompounds bzw. -blends aus verschiedenen Kunststoffarten herzustellen. Das Granulat wird im Schneckenförderer bzw. Extruder erwärmt und aufgeschmolzen. Anschließend wird die flüssige und homogenisierte Kunststoffschmelze in die Press- oder Spritzanlage gefördert bzw. gespritzt.

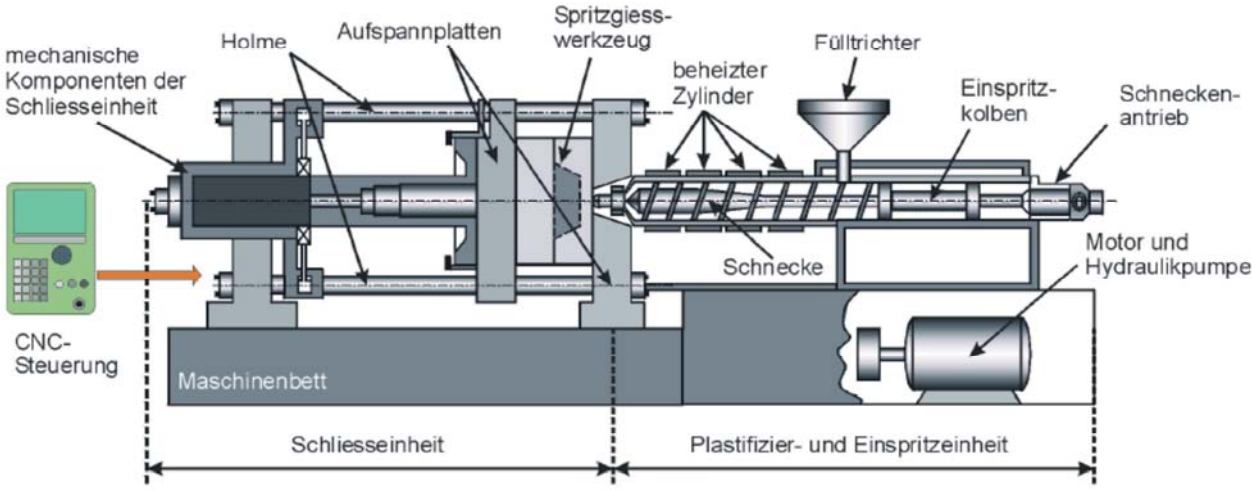


Abbildung 1: Typischer Aufbau einer Kunststoffspritzgießanlage [Bos2004]

Zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften können z.B. Glas- oder Kohlenstofffasern in verschiedenen Längen zugemischt werden. Dazu existieren verschiedene technische Möglichkeiten. Neben der Verarbeitung von Fasergranulaten (Abbildung 2, links), die in den Schneckenkanal des Extruders eingefüllt werden (Abbildung 2, rechts), besteht die Möglichkeit, die einzelnen Fasern erst während der

Verarbeitung im Extruder oder direkt in die Plastifizierungseinheit getrennt von der Polymermatrix, Abbildung 3, zuzufügen [Bür2003].

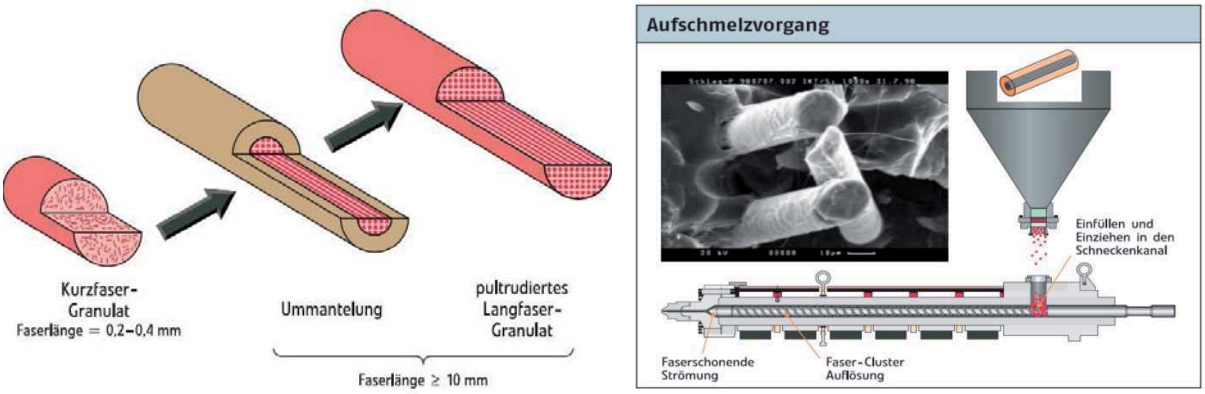


Abbildung 2: Direktverarbeitung von Langfasergranulaten in einer Spritzgießmaschine mit Extruder [Bür2003]

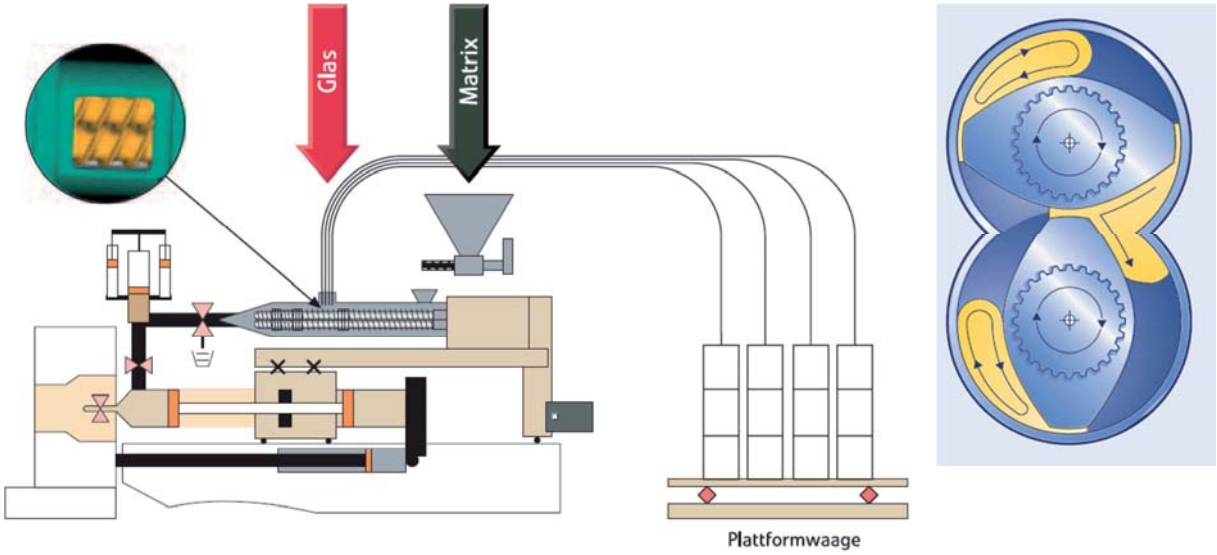


Abbildung 3: Getrennte Zugabe von Glasfasern und Kunststoff in eine Spritzgießcompoundmaschine mit Doppelschneckenextruder [Bür2003; Ber2009]

Aufgrund der höheren und besseren Homogenisierungsleistung bei niedrigen Scherbelastungen werden zum Einbringen und Mischen der Fasern vor allem Doppelschneckenextruder eingesetzt. Die Form der Schnecken wird immer den zu verarbeitenden Kunststoffen und den Fasern angepasst. Man unterscheidet zwischen Verteil- und Zerteilwirkung (Misch- und Scherteile) der Schnecken, Abbildung 4. Während die Schnecken-Nr. 5, 7, 8, 9 und 12 eine Mischwirkung haben, haben die Typen 2-4 eine Zerteil-(Scher-)wirkung auf Pigmente oder Fasern, was z.B. zu Faserkürzungen führen kann. Doppelschneckenextruder werden z.B. zur scherarmen Verarbeitung von PVC in Pulverform verwendet.

Nach [Hen1989] lässt sich mit einer gegenläufigen Doppelschnecke eine optisch bessere Verteilung von Glasfasern erzielen als im Vergleich zu einer Schnecke.

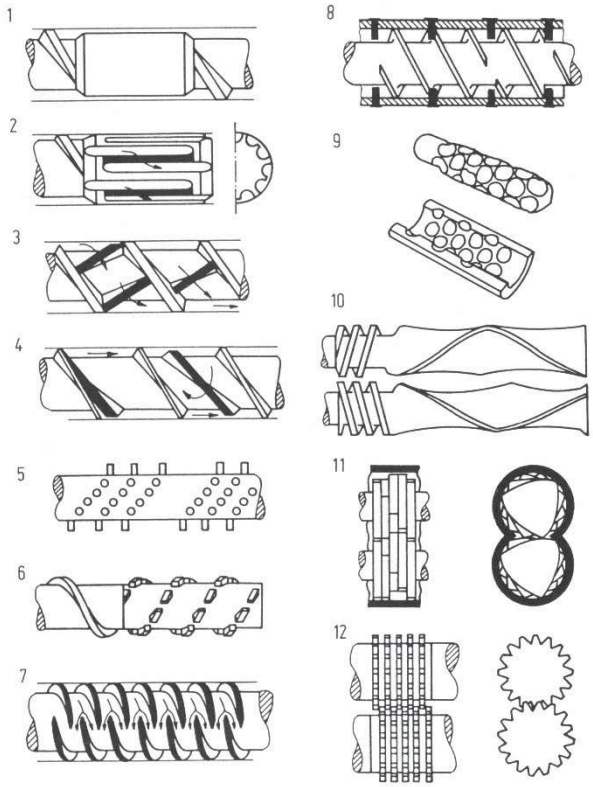


Abbildung 4: Schneckentypen zur Homogenisierung von Polymerschmelzen [Hen1989]

Um nochmals eine Verbesserung der Mischhomogenität, z.B. eine bessere Verteilung von Farbpigmenten, Treibgasen und von Schäumen oder Fasern zu erzielen, können statische Metallmischer eingesetzt werden, Abbildung 5. Diese werden aufgrund des hohen Druckverlustes in der Regel nur in Extrudern verwendet.

Abbildung 5: Statische Metallmischer zur Homogenisierung von Polymerschmelzen [Joh2001, Sul2008]

In Spritzgießanlagen kommen optimierte Mischköpfe und Düsen zum Einsatz, Abbildung 6, links. Zur Minimierung der Druckverluste werden insbesondere beim Spritzgießen dynamische Mischer, welche als Schneckenverlängerung direkt am Auslass der Förderstrecke sitzen, eingesetzt, Abbildung 6, rechts.

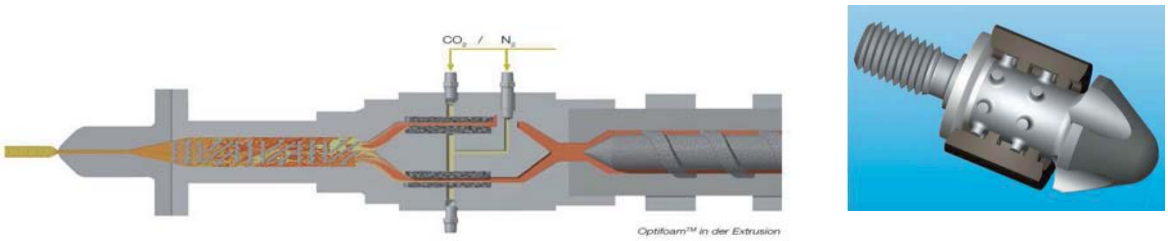


Abbildung 6: Mischkopf mit statischem Mischer (links) und dynamischem Mischer (rechts) zur Homogenisierung von Polymerschmelzen [Sul2006]

In Bezug auf die Verarbeitung vom Langfasern gilt es zu beachten, dass sowohl die Zähigkeits- als auch Festigkeit- und Steifigkeitssteigerung mit der resultierenden Faserlänge korrelieren und daher eine möglichst hohe Endfaserlänge anzustreben ist [Bür2003]. Die Verarbeitbarkeit der Kunststoffe ist ebenfalls zu berücksichtigen, da diese von der Faserlänge und vom Fasergehalt entscheidend beeinflusst wird. Zu lange Fasern verschlechtern das Fließverhalten, da die Viskosität der Polymerschmelze zunimmt und somit die Verarbeitbarkeit (Applikation) von Kunststoffmassen [Koh2007] beeinträchtigt wird. Wie bei den Kunststoffen gilt auch bei den Klebstoffen, dass ein Optimum zwischen Verarbeitbarkeit und Klebstoffperformance erreicht werden muss.

3.2 Rührwerke zur Klebstoffherstellung, -verarbeitung und -bereitstellung

Klebstoffe können neben Polymeren zu einem wesentlichen Teil aus Füllstoffen und Additiven bestehen. Diese Zusatzstoffe beeinflussen die Eigenschaften der Klebstoffe. Zur Herstellung von Klebstoffen und Erzielung einer hohen Kleb- oder Dichtstoffqualität sind daher Rührwerke notwendig. Mit deren Hilfe (siehe Abbildung 7, links) können Fasern oder Füllstoffe unter Vakuum in die Klebstoffmatrix eingemischt werden. Für unterschiedliche Einsatz- und Viskositätsbereiche gibt es entsprechende Rührertypen, die sich nach Strömung und Viskositätsbereich unterscheiden lassen (siehe Abbildung 7, rechts). Es handelt sich dabei um eine Batchverarbeitung. Solche Rührwerke lassen sich einsetzen, um bei der Klebstoffherstellung Fasern in gebrauchsfertigen Klebstoff (einkomponentig) bzw. in eine Komponente (bei zweikomponentigen Systemen) einzumischen. Ein kontinuierlicher Klebstoffauftrag oder ein Handauftrag auf einer Baustelle sind mit dieser Technologie nicht möglich.

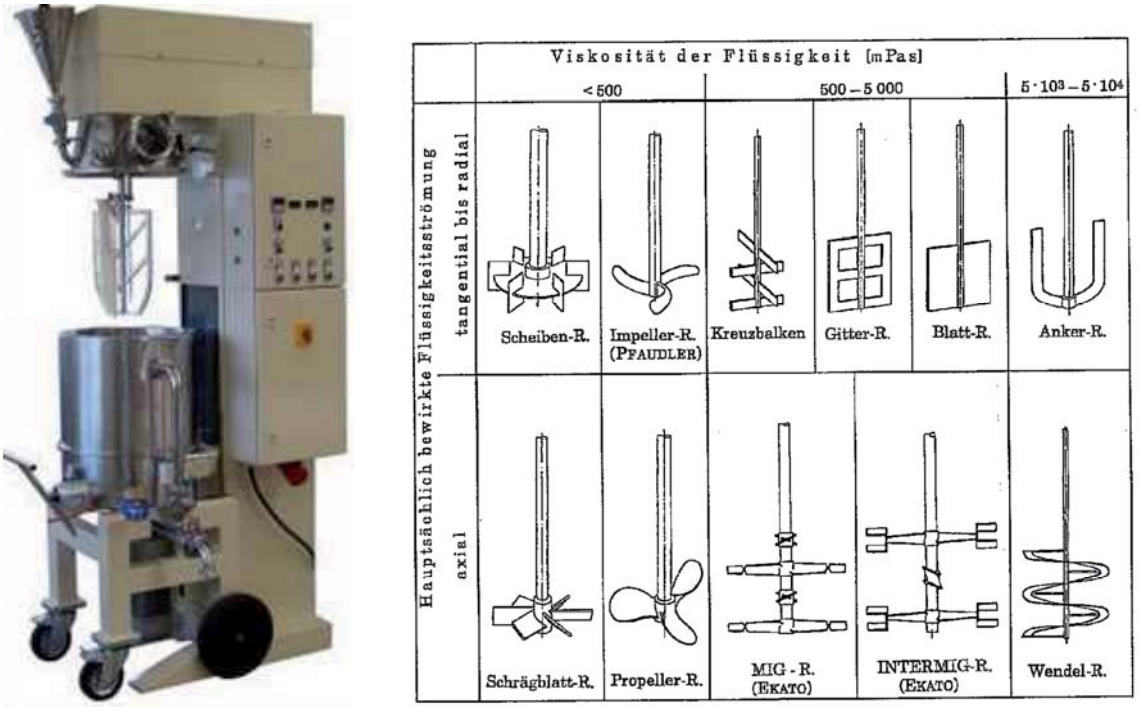


Abbildung 7: Vakuum-Planetenrührwerk und eine Darstellung gebräuchlicher Rührertypen [Her2008, Zlo1999]

3.3 Verarbeitung und Mischen von 2K-Klebstoffen

Im Vergleich zur Kunststoffverarbeitung mit einer Polymerschmelze bestehen zweikomponentige Klebstoffe aus zwei verschiedenen Bestandteilen, die miteinander reagieren, in der Regel eine unterschiedliche Viskosität haben können und die je nach Klebstoffformulierung in verschiedenen Mischungsverhältnissen zu verarbeiten sind. Während es in der Kunststoffverarbeitung primär um die Homogenisierung einer Komponente bei häufig festen Zusatzstoffen geht, müssen beim Mischen bzw. Homogenisieren von 2K-Klebstoffen zwei viskose Stoffe (A- und B-Komponente oder Harz und Härter) vor der Applikation in einem bestimmten Verhältnis vermischt werden. Aufgrund der Topfzeitproblematik - damit ist die Zeit gemeint, in der der Klebstoff gemischt und appliziert und das Bauteil fixiert sein muss - kommt es zur Limitierung der möglichen Verarbeitungsdauer des Klebstoffes. Durch die fortschreitende Reaktion steigt die Viskosität und der Klebstoff kann schließlich nach Überschreiten der Topfzeit die zu verbindenden Oberflächen nicht mehr ausreichend benetzen. Des Weiteren ist es möglich, dass der Klebstoff aufgrund der Viskositätserhöhung die Dosiereinheit zusetzt, so dass die Einheit anschließend aufwändig gereinigt oder ausgetauscht werden muss.

Abbildung 8 zeigt den schematischen Aufbau einer Klebstoffverarbeitungsanlage für zweikomponentige Systeme mit einem statischen Mischer.

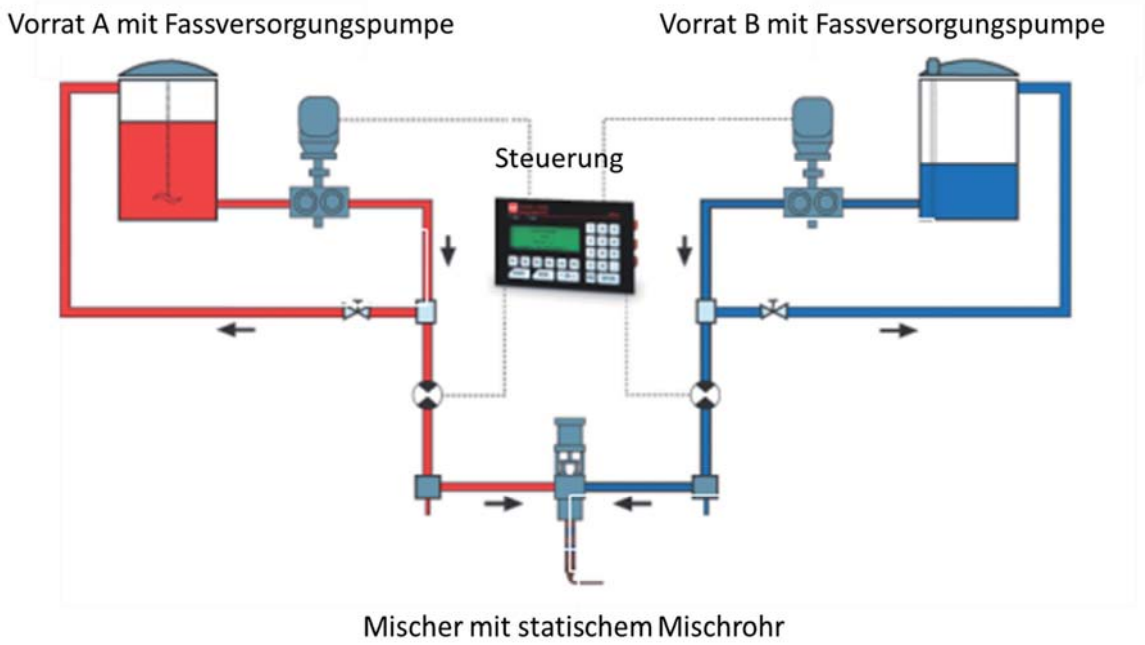


Abbildung 8: 2K-Klebstoffanlage mit Zahnraddosierpumpen [Hil2009]

Die Materialversorgung erfolgt über Fassversorgungspumpen, Abbildung 9, links, welche optimal mit Zahnrad- oder Exzenterschneckenpumpen ausgestattet sein können, um auch hochviskose Klebstoffe zu fördern. Für dünnflüssige Medien können Druckbehälter verwendet werden. Die Behälter können zudem ein Rührwerk besitzen, um Ablagerungen und Inhomogenitäten zu vermeiden, Abbildung 9, rechts.

Abbildung 9: Fassversorgungspumpe(links), Fassversorgungspumpe mit Exzenterschneckenpumpe und Druckbehälter mit Rührwerk (rechts) [Hil2009, Vis2009]

Das Dosieren der beiden Komponenten vor dem Mischen erfolgt mit einer Zeit-Druck-Dosierung oder volumetrisch mit Zahnrad-, Exzenterschnecken- oder Kolbendosierpumpen. Die materialschonenste Verarbeitung bzw. Förderung von Klebstoffen erfolgt mit einer Exzenterschneckenpumpe. Durch eine Zahnraddosierpumpe könnten durch die Scherung der Zahnräder Füllstoffe oder Fasern qualitativ verändert werden.

Bei einem Handauftrag sitzen die Dosierpumpen in der Regel direkt an der Anlage, Abbildung 10. Die Auftragspistole mit Mischer und Dosierventilen ist über Schläuche mit der Dosieranlage verbunden, was das Gewicht der Auftragseinheit reduziert und eine Handhabung ermöglicht. Bei einer industriellen Anlage können die Dosierpumpen direkt vor dem Mischkopf bzw. Ventil angeordnet sein.

Abbildung 10: Vergleich von Handauftragseinheit mit statischem Mischer (links) und statischer Mischkopf mit zwei Exzenterschneckenpumpen (rechts) [Hil2009, Vis2009]

Im Hinblick auf die Mischungsweise der 2K-Werkstoffe werden statische, statisch-dynamische und dynamische Mischer unterschieden. Bei hohen Viskositätsunterschieden oder auch extremen Mischungsverhältnissen der Komponenten ist nur der dynamische Mischer sinnvoll einsetzbar. Störend in der Handhabbarkeit von Handapplikationsgeräten sind die langen Mischrohre der statischen und statisch-dynamischen Mischrohren. Auch hier punktet der dynamische Mischer mit seiner vergleichsweise kleinen Mischkammer.

<u>Statisches Mischrohr</u>

Für reaktive zweikomponentige Systeme verwendet man statische Mischrohre, in deren Innerem sich jeweils um 90° versetzte Mischwendeln befinden. Im Unterschied zu den statischen Mischern in der Polymerverarbeitung sind diese meist aus Kunststoff und nicht aus Metall, da die auftretenden Systemdrücke und -temperaturen niedriger sind. Es handelt sich um günstige Einwegprodukte. Nach einem Einsatz können die Mischer mit dem gemischten und reagierten Inhalt entsorgt werden. Die Mischungs-

energie resultiert aus der Strömungsenergie der sich vereinigenden Komponenten im Inneren des Mischrohres, Abbildung 11.

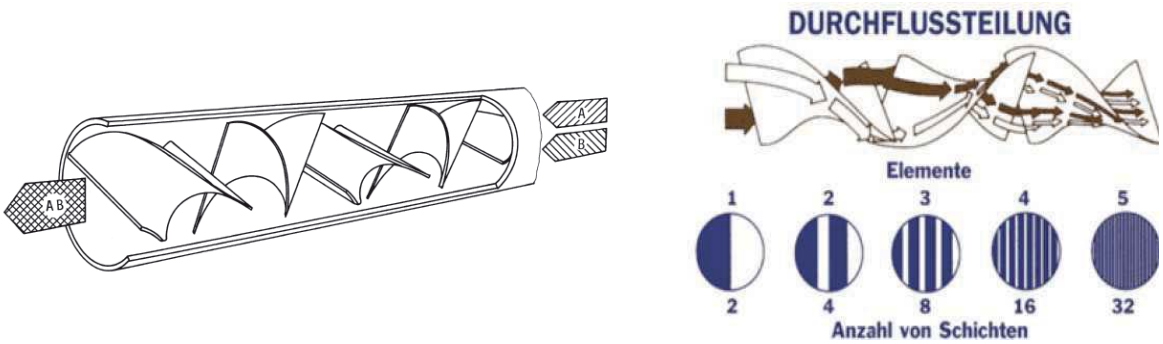


Abbildung 11: Aufbau eines statischen Mischrohres [Hab2006]

Für kleinvolumige Anwendungen sind preiswerte Einweg-Mischrohre aus Kunststoff im Handel erhältlich, Abbildung 12.

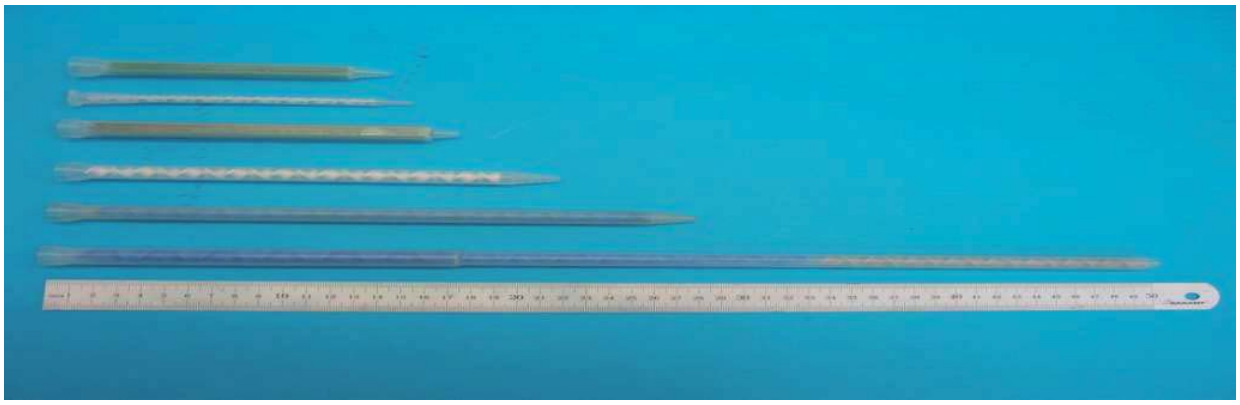


Abbildung 12: Unterschiedliche statische Mischrohre

Bei längeren Produktionsunterbrechungen wird das Mischrohr ersetzt. Bei Unterschieden im Mischungsverhältnis bzw. bei Viskositätsunterschieden der Komponenten muss die Länge des Mischrohrs und die Anzahl der Mischwendeln stark vergrößert werden, um eine ausreichende Durchmischung zu erzielen.

Statisch-Dynamische Mischer

Auf einem ähnlichen Prinzip wie das statische Mischrohr beruht der statisch-dynamische Mischer, Abbildung 13. Der im Mischrohr befindliche Mischer besteht ebenfalls aus um 90° versetzten Mischwendeln. Die Mischwendel wird durch einen langsam drehenden elektrischen oder pneumatischen Antrieb zusätzlich in Rotation gebracht. Die Mischungsenergie resultiert aus der Strömungsenergie der sich vereinigenden Komponenten im Inneren des Mischrohres und der eingebrachten mechanischen Energie. Die rotierende Mischwendel führt zu einer verbesserten Homogeni-

tät der Mischung. Statisch-dynamische Mischsysteme werden bei erhöhtem Bedarf an Mischungsenergie eingesetzt.

Abbildung 13: Statisch-Dynamischer Mischer [Hil2009]

Dynamischer Mischer

Der dynamische Mischer, Abbildung 14, wird eingesetzt, um auch schwer mischbare Materialien mit zum Teil kurzen Topfzeiten, sehr unterschiedlichen Viskositäten der Einzelkomponenten und extremen Mischungsverhältnissen zu verarbeiten. Bei der Mischung der Komponenten mittels Dynamikmischer stellen die hohen Investitionskosten einen wesentlichen Nachteil dar, der jedoch aufgrund der sehr guten Eignung dieses Mischverfahrens in automatisierten Anlagen bei hohem kontinuierlichem Werkstoffdurchfluss in vielen automatisierten Anwendungen gerechtfertigt werden kann. Ein Reinigungsvorgang ist nach dem Applizieren bzw. vor Ablauf der Topfzeit notwendig, um Schäden am Gerät abzuwenden. Aufgrund der massiven Bauart sind herkömmliche Dynamikmischer nicht an Handapplikationsgeräten verwendbar.

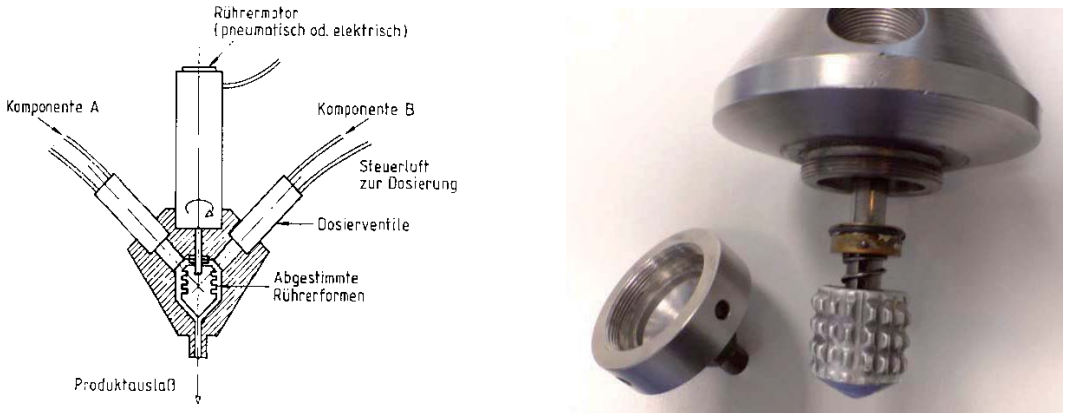


Abbildung 14: Dynamikmischer [End1990]

Im zahnmedizinischen Bereich sind bereits Einweg-Dynamikmischer, Abbildung 15, erhältlich. Diese Mischer sind für dentale Abgussmassen-Mischanlagen konzipiert, und können nicht auf alle 2K-Klebstoffsysteme übertragen werden. Sie bieten den Vorteil, dass die gute Mischqualität der Dynamikmischer erreicht wird, der Mischkopf jedoch nach einmaligem Gebrauch wie ein statisches Mischrohr entsorgt wird.

Abbildung 15: Dynamikeinwegmischer

Für die Applikation von hochviskosen 2K-Klebstoffen im Reparaturfall von Scheibenklebungen existiert eine Handpistole DOW Betagun® III, Abbildung 16. Die Materialversorgung erfolgt über Kartuschen, gemischt wird dynamisch mit einem tauschbaren Einwegmischkopf.

Abbildung 16: 2K-Handpistole Dow Betagun® III, Dow Chemical Company

Die dargestellten Beispiele zeigen, dass für eine Verarbeitung zweikomponentiger Klebstoffe industriell umfangreiche Möglichkeiten zu Verfügung stehen. Häufig war bislang jedoch eine zusätzlich eingearbeitete dritte Komponente, wie z.B. Fasern, im Klebstoff problematisch. Die größten Schwierigkeiten sind dabei die notwendige Homogenität der resultierenden, gemischten Masse, eine Verarbeitung, bei der die Faserlänge nur geringfügig oder gar nicht reduziert wird, sowie eine möglichst geringe Anlagenschädigung durch Abrasion zu gewährleisten.

3.4 Viskositätsproblematik und Faserschädigung

Aufgrund der großen Oberfläche der Fasern kommt es bei der Homogenisierung des 2K-FvKs zu einer starken Faser-/Matrixwechselwirkung, die eine deutliche Viskositätssteigerung des Klebstoffs verursacht. Faserverstärkte Kunststoffe erreichen Viskositäten von bis zu 10^6 Pas [Alv2004]. Mit zunehmendem Fasergehalt oder –länge nimmt die Viskosität zu. Die hohe Viskosität einer oder beider Komponenten erschwert das Mischen der einzelnen Klebstoffkomponenten. Unverstärkte 2K-Klebstoffe haben in der Regel Viskositäten von lediglich 10^2 Pas des Harzes und 10 – 20 Pas des Härters. Untersuchungen von Crowson [Cro1980] an unverstärktem PA 6.6 und PA 6.6 mit 30% Kurzglasfaser zeigten im Bereich von Scherraten unterhalb von 10^3 s^{-1} eine deutliche Viskositätserhöhung des verstärkten Materials. Höhere Scherraten, welche beispielsweise beim Durchströmen einer Düse auftreten, führen zu einer Ausrichtung der Fasern. Aufgrund der Ausrichtung der Fasern wird die Viskosität herabgesenkt und liegt im Bereich des unverstärkten Materials [Cha1978].

Beim Extrudieren bzw. Spritzen kann es durch Scherung zu einer Faserlängenreduktion kommen [Sch1997]. Diese ist abhängig von der Einspritz- bzw. Schergeschwindigkeit. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass es ähnlich wie im Bereich der Verarbeitung von kurz- und langfaserverstärkten Kunststoffen zu abrasiven Verschleißschäden und lochfraßähnlichen Korrosionsangriffen kommen kann [Bra1980].

Die beschriebenen Problematiken waren die Grundlagen für die durchzuführenden Untersuchungsschwerpunkte für 2K-faserverstärkte Klebstoffe (2K-fvK) innerhalb des vorliegenden Projektes.

4 Problemstellung und Zielsetzung

Der Kenntnisstand über die Klebstoffeigenschaften und die Verarbeitung bzw. die Prozesskette zur Herstellung von 2K-fvKs ist noch sehr gering. Fakt ist jedoch, dass es aufgrund der großen Oberfläche der Fasern zu einer starken Faser-Matrixwechselwirkung kommt, die eine deutliche Steigerung der Klebstoffviskosität verursacht. Die hohe Viskosität erschwert das Mischen der zwei einzelnen Klebstoffkomponenten mit den Fasern.

Bislang gibt es aus dem Bereich der Klebstoffverarbeitung für eine Applikationseinheit keine kleinen und kompakten Bauformen, welche einen Handauftrag solcher Klebstoffe ermöglicht. Außerdem war die optimale Reihenfolge, in der die einzelnen Komponenten miteinander vermischt werden, nicht hinreichend untersucht. Der Einfluss der Mischtechnik auf die Klebstoffeigenschaften war nur teilweise bekannt, so dass man davon ausging, dass es wie in der Kunststoffverarbeitung insbesondere beim Einsatz von dynamischen Mischern zu einer Verkürzung bzw. Schädigung von Fasern kommen kann. Darüber hinaus war davon auszugehen, dass es beim Mischen von 2K-fvKs ähnlich wie im Bereich der Verarbeitung von kurz- und langfaserverstärkten Kunststoffen zu abrasiven Verschleißschäden und lochfraßähnlichen Korrosionsangriffen an der Anlagentechnik kommen kann [Bra1980]. Hierzu existierten allerdings bislang keine Untersuchungen bezüglich der Größe des abrasiven Einflusses durch die fvKs und deren Wirkung auf verschiedene Pumpen- und Dosiersysteme, Mischer und Düsen.

Die durchgeführten Forschungsarbeiten sollten somit dazu dienen, Grundlagen bezüglich des mechanischen Verhaltens von 2K-fvKs zu erarbeiten und effektive Verarbeitungsprozessketten zu entwickeln. Basis dafür war die Beschreibung und gezielte Verbesserung der Materialeigenschaften der neuen innovativen Werkstoffklasse. Die notwendigen Prozessparameter für die Verarbeitbarkeit von 2K-fvKs waren zu untersuchen und zu optimieren. Dabei sollten als möglicher Einsatzbereich z.B. Herstellen von Eckverbindungen und Stößen aus (Hohl)Profilen untersucht werden.

4.1 Methodischer Ansatz zur Erreichung des Forschungsziels

Die Applikationseigenschaften von Klebstoffen werden im Wesentlichen durch die rheologischen Eigenschaften beschrieben. Daher dienten die Charakterisierung des Fließverhaltens der einzelnen Komponenten und die Korrelation mit den untersuchten rheologischen Eigenschaften der 2K-fvKs als Basis für das gesamte Projekt.

Alle Arbeiten können somit nach folgenden Teilzielen gruppiert werden:

1. Teilziel: Rheologische Charakterisierung

Die rheologischen Eigenschaften der 2K-fvKs und der zu mischenden Einzelkomponenten wurden bestimmt, mit den Fragestellungen:

a. Einfluss unterschiedlicher Klebstoffmatrizes

b. Einfluss der Fasern - Art, Länge und Anteil - auf die Viskosität der Einzelkomponenten

c. Einfluss der Fasern auf die Viskosität des gemischten Klebstoffes

2. Teilziel: Mechanische Charakterisierung

Die mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Dehnung usw.) der 2K-fvKs waren systematisch darzustellen:

a. Einfluss der Fasern - Art, Länge, Anteil - auf die Eigenschaften des reinen Klebstoffes

b. Einfluss der Fasern - Art, Länge, Anteil - auf die Verbundeigenschaften

c. Trag- und Verformungsverhalten typischer Konstruktionsformen

3. Teilziel: Verarbeitungs- und Applikationsmethoden

Verarbeitungs- und Applikationsmethoden für 2K-fvKs waren zu entwickeln. Ziel war der Aufbau einer kompakten Pistole für den Handauftrag unter Berücksichtigung folgender Problemstellungen:

a. Auslegung und Auswahl von Materialbehälter, Pumpen und Dosieren und der Förderstrecke (Rezirkulation)

b. Auswahl von Mischern und Erarbeitung von Mischparametern

c. Erstellung einer Prozesskette, Reihenfolge in der die einzelnen Komponenten gemischt bzw. die Fasern zugemischt werden

4. Teilziel: Aufbau einer Applikationseinheit

a. Entwicklung der Einzelkomponenten bzw. Modifikation einer bestehenden Anlage

b. Auslegung der Prozesskette zum Mischen für 2K-fvKs und Ermittlung der Prozessparameter

c. Optimierung der Applikationseinheit und des Prozesses nach Mischversuchen

5. Teilziel: Einfluss der Prozessierung auf die Eigenschaften

Durch die Prozessierung der vorher untersuchten Klebstoffe konnte sowohl die Verarbeitbarkeit mit den analytischen Kennwerten korreliert werden als auch mögliche Schädigungen an der Applikationseinheit und/oder Matrix bzw. Faser untersucht werden:

a. Einfluss der Mischer (Art und Geometrie) auf die Fasern (Faserreduktion) und die mechanischen und rheologischen Klebstoffeigenschaften

b. Einfluss der Mischparameter (Drehzahl, Durchflussrate) auf die Fasern (Faserreduktion) und die mechanischen und rheologischen Klebstoffeigenschaften

c. Untersuchung des Verschleißes an Pumpen, Mischer und Düsen

d. Untersuchung der Schädigung von Klebstoff und Fasern

6. Teilziel: Darstellung von Anwendungsgebieten

Die verschiedenen bis hierhin dargestellten Teilziele dienten als Grundlage für die Darstellung weiterer möglicher Anwendungsgebiete.

4.2 Anmerkungen zur Vorgehensweise

Die hier beschriebene Gliederung nach Teilzielen entspricht dem beschriebenen Vorgehen laut Projektantrag.

Die Gewichtung der Untersuchungen während des Projektverlaufes wurde zusammen mit dem projektbegleitenden Ausschuss (PA) bewertet und gelenkt.

Um die Ergebnisse des Forschungsprojektes möglichst anwendernah entwickeln und bewerten zu können, wurden im Speziellen mit dem PA-Mitglied Schüco International KG bestehende Eckverbinder für Hohlprofile mit Hilfe eines der neu entwickelten 2K-fvKs geklebt bzw. verstärkt.

Im Projekt wurde auf diesen Anwendungsfall besonderes Augenmerk gelegt und hinsichtlich der Anforderungen an die Applikationstechnik diesbezüglich Rücksicht genommen. Es wurde auf vorhandene Anlagentechnik (Handapplikation, Pumpentechnologie) zurückgegriffen und die Grenzen dieser Anlagen evaluiert.

Der Anwendungsfall der geklebten Eckverbindungen von Hohlprofilen wurde als ausschlaggebendes Kriterium für die Bewertung der Klebstoff-Faser-Systeme gewählt.

5 Durchführung und Ergebnisse

Anhand der oben definierten Teilziele werden im Folgenden das Vorgehen sowie die erhaltenen Ergebnisse dargestellt.

5.1 Werkstoffauswahl

5.1.1 Auswahl der Versuchsklebstoffe und Fasern

Zweikomponentige Epoxidharzklebstoffe werden aufgrund ihrer klebtechnischen Eigenschaften hinsichtlich Festigkeit und Verarbeitbarkeit von dem potentiellen Anwenderkreis im Baubereich bevorzugt verwendet. Aus diesem Grund wurden innerhalb des Projektes drei unterschiedliche Epoxidharzsysteme verschiedener Hersteller auf ihre Eigenschaften hin untersucht, Tabelle 1.

Tabelle 1: Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe (laut Datenblatt)

Klebstoff	Mischungsverhältnis Harz:Härter	Topfzeit [min]	Dichte [kg/l]	E-Modul [N/mm^2]	Zugfestigkeit [N/mm^2]
Klebstoff 1	4:1	90 (20°C) 30 (35°C)	1,3	4500	30
Klebstoff 2	3:1	110 (20°C) 50 (35°C)	1,6	11200	21
Klebstoff 3	100:50	120 (20°C) 30 (40-45°C)	1,16	3000	68-80

Der nur leicht gefüllte Klebstoff 1 erreicht laut Datenblatt einen E-Modul von 4500N/mm² und eine Zugfestigkeit von 30N/mm². Der zusätzlich mit Quarzsand gefüllte Klebstoff 2, eine Modifikation von Klebstoff 1, steigert den E-Modul auf 11200N/mm² bei einer Zugfestigkeit von 21N/mm².

Laut Datenblatt besitzt der Klebstoff 3 einen E-Modul (Zug) von 4560 N/mm² und eine Zugfestigkeit von 62 N/mm². Die höheren Festigkeiten werden durch die bereits erfolgte Einformulierung von bis zu 2,5mm langen Glasfasern erreicht. Dieser Klebstoff wurde im laufenden Projekt mit in die Untersuchungen einbezogen; er wird bereits in Windenergieanlagen eingesetzt. Klebstoff 3 ist mit unterschiedlichen Härtern aus der dazugehörigen Serie kombinierbar. Dadurch sind Topfzeiten zwischen 30 Minuten und ca. 3 Stunden (bezogen auf Raumtemperatur) wählbar, bei weitestgehend gleichbleibenden mechanischen Eigenschaften des ausgehärteten Klebstoffes.

Bei der Faserauswahl wurden Kohlenstofffasern, Glasfasern und Aramidfasern berücksichtigt, Abbildung 17 und Tabelle 2. Dabei wurden nur Langfasern ≥ 3mm ausgewählt.

Abbildung 17: Faserarten von links nach rechts: Kohlenstofffasern, Glasfasern, Aramidfasern. Die gezeigten Mengen entsprechen einem vergleichbaren Gewicht.

Tabelle 2: Eingesetzte Fasern (Langfasertypen ≥ 3mm)

Faserart	Typ	Schlichte	Faserlänge
Kohlenstofffaser	Tenax-J HT C 261	1,3% Epoxidharz	3mm
Glasfaser	Typ-E	2-3% Silan	5mm
Aramidfaser	Kevlar-29	keine	6mm

Die Kohlenstofffasern vom Typ Tenax-J HT C261 sind bereits mit Epoxidharz (EP) präpariert. Diese Schlichte optimiert die Anbindung der Faser an den Klebstoff und führt voraussichtlich zu einer Erhöhung von E-Modul und Festigkeit. Auch die Glasfasern sind mit einer 2-3% Silan-Schlichte zur Verbesserung der Anhaftung modifiziert. Nur die Kevlar-29 (Aramid) Fasern wurden ohne Präparation eingesetzt.

5.1.2 Ermittlung möglicher Klebstoff-Faser-Kombinationen

Die Klebstoffe wurden mit den verschiedenen Faserarten in unterschiedlichen Anteilen modifiziert. Hauptsächliches Augenmerk wurde dabei auf den bereits mit Quarzsand gefüllten Klebstoff 2 gelegt, der zwar eine geringere Festigkeit im Vergleich zum ungefüllten Klebstoff 1 aufweist, dafür aber einen wesentlich größeren E-Modul. Tabelle 3 zeigt exemplarisch die untersuchten Modifikationen von Klebstoff 2.

Klebstoff 1 wurde im Vergleich dazu nur mit fünf unterschiedlichen Kohlenstofffaseranteilen von zwei bis zehn Massenprozenten modifiziert.

Tabelle 3: Durchgeführte Modifikationen an Klebstoff 2

Faserart	Typ	Kürzel	Faser-Zumischung zum Klebstoff 2 [%]					
Kohlenstoffffaser	Tenax-J HT C 261	CF	1	2	3	4	5	6
Glasfaser	Typ-E	GF	1	5	10	15	20	
Aramidfaser	Kevlar-29	AF	0,5	1	1,5			

Der höhere Füllgrad durch Quarzsand von Klebstoff 2 zeigt sich in der niedrigeren Aufnahmefähigkeit weiterer Füllstoffe. So konnte die Mischung maximal 6% Kohlenstofffasern aufnehmen, im Gegenzug zu 10% beim Klebstoff 1. Ebenfalls unterschieden sich die maximalen Aufnahmefähigkeiten nach Gewichtsanteilen aufgrund der Faserarten. Dies ist in den sich stark unterscheidenden Dichten der Faserarten zu begründen, siehe auch Abbildung 17.

5.2 Mechanische und analytische Methoden

5.2.1 Quasistatische Zug- bzw. Zug-Scherversuche

Zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der unmodifizierten und modifizierten Klebstoffe wurden für Zugversuche Substanzproben in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4 [DIN527-4], Abbildung 18, hergestellt und mit 1 mm/min geprüft.

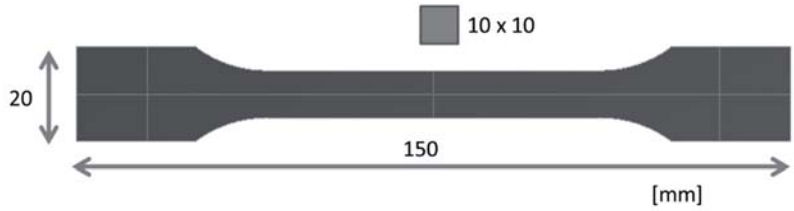


Abbildung 18: Zugprobe nach DIN EN ISO 527-4

Aus diesen Proben wurden Werte für den E-Modul und die Zugfestigkeit ermittelt.

Die Proben wurden aus den ausgewählten Klebstoffen hergestellt, dabei wurde nach Herstellervorgabe das Mischungsverhältnis, Tabelle 1, gravimetrisch eingestellt. Die Ansatzgröße lag zwischen 400 g und 800 g. Die Homogenisierung der Proben erfolgte durch Mischen mittels KPG-Rührer in ca. 1 Liter-Dosen.

Die noch flüssige Reaktionsmasse wurde in einer pneumatischen Presse auf die geforderte Dicke von 5mm gebracht. Die Aushärtung erfolgte dann bei Raumtemperatur.

Neben den Substanzproben wurden Zug-Scher-Proben in Anlehnung an DIN EN 1465 [DIN1465] hergestellt und mit 10 mm/min geprüft. Notwendig wurden diese Prüfungen aufgrund des untersuchten Anwendungsfall der Klebung von Eckverbindern an Hohlprofile, Kapitel 5.7.

Als Substrat wurde dazu Aluminium verwendet. Als Vorbehandlung wurde Reinigen mit Isopropanol gewählt. Die Proben wurden vor Prüfung für vier Wochen bei Raumtemperatur gelagert.

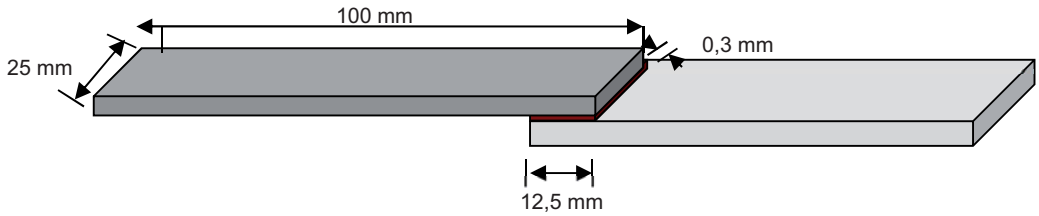


Abbildung 19: Zug-Scher-Proben gemäß DIN EN 1465

Für die Prüfungen wurde eine 20 kN Universal-Prüfmaschine EasyTest EZ20, Abbildung 20, des Herstellers Lloyd Ametek GmbH verwendet.

Abbildung 20: EasyTest EZ20 Prüfmaschine mit externer Wegaufnahme

5.2.2 Rheologie

Die Rheologie [Mez2010] ist die Lehre von der Deformation und vom Fließen der Substanzen. In den Messungen betrachtet man sowohl das Fließen von idealelastischen Flüssigkeiten als auch das Deformationsverhalten von idealelastischen Festkörpern als die beiden Extreme. Alle realen Substanzen besitzen sowohl einen viskosen als auch einen elastischen Anteil, man nennt dieses verhalten viskoelastisch.

Die grundlegenden rheologischen Parameter werden mit Hilfe des Zwei-Platten-Modells definiert. Eine obere Platte mit der Scherfläche A wird dabei durch die Scherkraft F bewegt und es wird die resultierende Geschwindigkeit v gemessen. Die untere Platte bleibt dabei unbewegt, v=0. Im Spalt zwischen den beiden Platten mit dem Abstand h wird die Probe geschert. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Probe an beiden Platten eine Wandhaftung besitzt und nur laminare Strömungen auftreten. Die Schubspannung τ ist definiert als F/A. Die Scherrate $\dot{\gamma}$ entspricht dann v/h. Typische Scherratenbereiche sind für das Verkneten und Anmischen 1 bis 100, für Extrusion 10 bis 1000 und das Mischen und Rühren 10 bis 10^4 s^{-1}.

Werden in einem fließenden Fluid Moleküle gegeneinander verschoben, so kann man den auftretenden Fließwiderstand als Viskosität auswerten. Für ein idealviskoses Fluid ist bei einer konstanten Temperatur das Verhältnis zwischen Schubspannung τ und der Scherrate $\dot{\gamma}$ eine Materialkonstante, die Scherviskosität η. Für Polymerschmelzen in Schmelzklebstoffen typische Viskositätswerte liegen bei 100kPas.

Bei niedrigen Scherraten bis zur Spaltentleerung erfolgt die Messung der Fließkurven im Rotationsrheometer mittels Rotationsversuch. Oberhalb der Scherraten, ab der sich eine Spaltentleerung einstellt, wird die Viskosität im Kapillarrheometer gemessen.

Da zur Herstellung von Proben für die Rheologie jeweils nur kleine Mengen (einige Gramm) benötigt wurden, wurde die Homogenisierung der Reaktionsmassen mit kleinen Mengen im Speedmixer durchgeführt – im Gegensatz zu den Proben für die mechanische Charakterisierung nach Kapitel 5.2.1. Das Grundprinzip des Speedmixers beruht auf Rotationskräften, die es ermöglichen, verschiedene Substanzen mit äußerst geringem Aufwand homogen und blasenfrei zu vermischen. Als Mischbehälter können sowohl wieder verwendbare als auch Einwegbecher eingesetzt werden. Da dieses System ohne weitere Mischwerkzeuge arbeitet, entfallen aufwendige Reinigungen [Hau2013].

Innerhalb des Projektes wurden die Klebstoffviskositäten mit und ohne Fasern mit einem Kinexus-Rheometer der Firma Malvern Instruments Ltd ermittelt, Abbildung 21.

Abbildung 21: Kinexus Rheometer der Firma Malvern Instruments Ltd

Als Prüfgeometrie wurde ein Platte-Platte-Messystem mit 40 mm Durchmesser bei 1 mm Spalt ausgewählt, da dies für Polymerprüfungen mit hoher Viskosität bzw. Polymerschmelzen empfohlen wird. Die Notwendigkeit des vergrößerten Spaltes ergibt sich aus der Art und der Größe der Füllstoffe (z.B. Quarzsand).

Für alle Proben wurden jeweils schubspannungsgeregelte, oszillierende Messungen bei 25°C mit einer Frequenz von einem Hertz durchgeführt.

In einem ersten Schritt der Rheologiemessungen wurde ein Frequenzsweep durchgeführt, um den Einfluss der Frequenz (äquivalent zur Scherrate) auf die modifizierten Klebstoffe zu bestimmen. Dies erleichtert vor allem die Erkennung der Überfüllung eines modifizierten Klebstoffes, Abbildung 22. Hier ist zu erkennen, dass Klebstoff 1 ab 8% Kohlenstofffaseranteil „überfüllt“ ist.

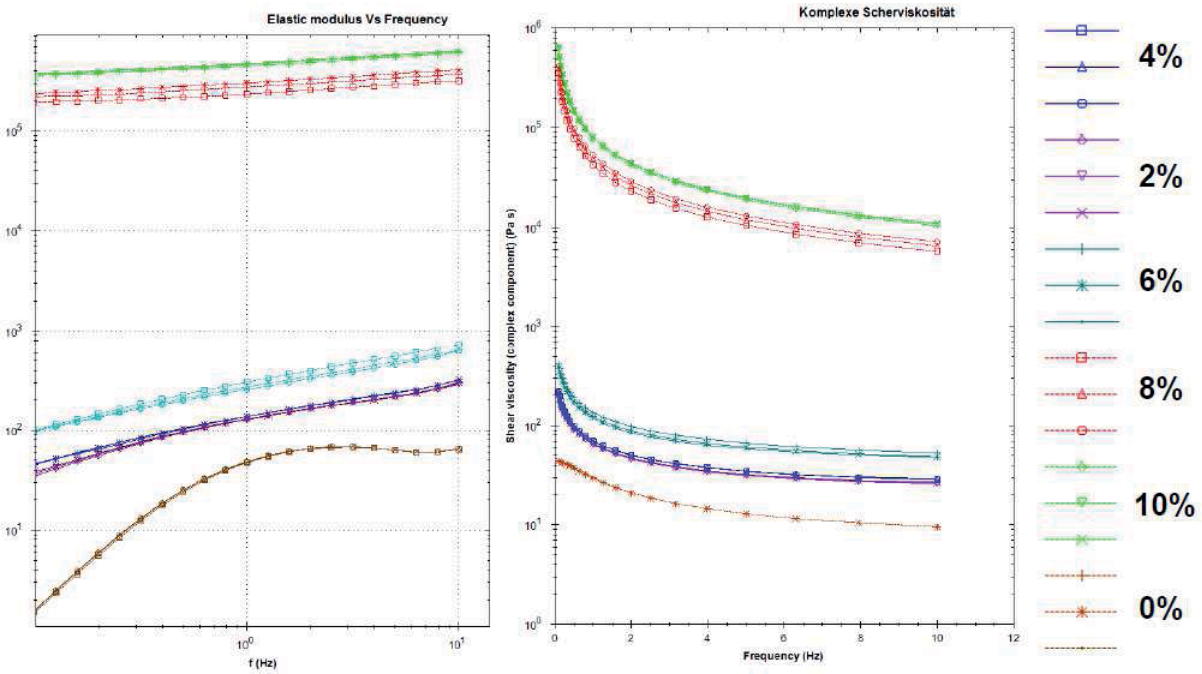


Abbildung 22: Frequenzsweep von Klebstoff 1 mit Kohlenstofffaseranteilen

In der komplexen (oszillierenden) Rheometrie wird im sogenannten Frequenzbereich gemessen, bei der rotierenden Rheologie wird im Zeitbereich gemessen. Das Messergebnis der oszillierenden Rheologie sind komplexe Messgrößen mit Real- und Imaginärteil. Nach der Cox-Merx-Regel – der Betrag der komplexen Viskosität $|\eta^*|$ für eine Deformationsfrequenz ω entspricht dabei der stationären Scherviskosität η bei einer Scherrate $\dot{\gamma} = \omega = 2\pi f$ – kann die Frequenz in eine äquivalente Scherrate bei den meisten Polymeren übertragen werden. Aufgrund der Art der Füllstoffe gilt es, dies zu überprüfen. Beispielhaft ist dies am Harz von Klebstoff 3 mittels einer rotierenden und einer oszillierenden Messung dargestellt, Abbildung 23. Mit der Beziehung $\omega = 2\pi f$ wird aus der Scherrate $50s^{-1}$ die Frequenz 8,3 Hz. Aus der rotierenden Messung kann über die Zeit eine konstante Viskosität von 40 Pas und eine dazugehörende Spannung von 2000 Pa gemessen werden. In der komplexen Rheologie ist in diesem Beispiel die Spannung auf der x-Achse dargestellt. Bei einem Wert von 2000 Pa kann hier ebenfalls eine Viskosität (Betrag!) von 40 Pas abgelesen werden. Damit wurde für diese Messung die Cox-Merx-Regel bestätigt.

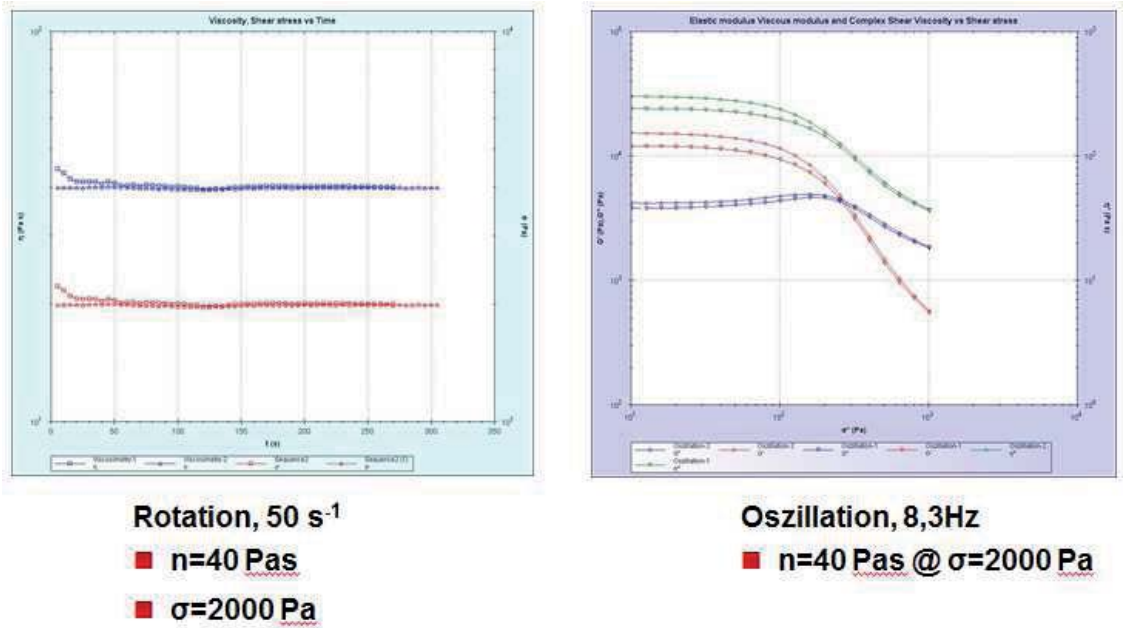


Abbildung 23: Gültigkeit der Cox-Merx-Regel

Die Bestimmung der Fließgrenzen (*flow points*) und der Nachgebgrenzen (*yield points*) erfolgt oszillierend im Amplitudentest. Dabei wird die Amplitude variiert und die Frequenz (1Hz) sowie die Messtemperatur (25°C) konstant gehalten. Als Messergebnis erhält man den Speicher- (G‘) sowie den Verlustmodul (G‘‘). Dadurch sind Aussagen bzgl. des Strukturcharakters und die Grenzen des linear-viskoelastischen (LVE)-Bereiches bestimmbar. Voraussetzung für eine Bestimmung der Nachgeb- und Fließgrenzen mittels dieser Methode ist, dass G‘>G“ im LVE-Bereich als wahr gegeben ist. Damit existiert also ein Gel-Charakter.

Die Nachgebgrenze τ_y ist definiert als der Grenzwert des LVE-Bereichs, hier beginnt G‘ zu sinken und verlässt den LVE-Plateauwert, Abbildung 24.

Dort, wo G‘ und G“ sich schneiden, ändert sich der Gel-Charakter in den Flüssigkeitscharakter. Dann gilt G‘<G“. Dieser Punkt wird als Fließgrenze definiert τ_f. Dieser Punkt wird im englischen oft (fälschlicherweise) als *yield-point* bezeichnet, da in der Praxis diese beiden Punkte oft ineinander verschmelzen.

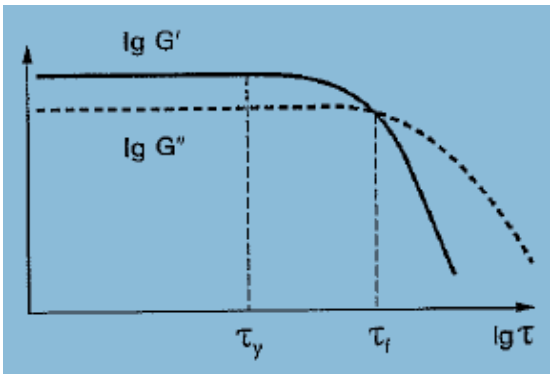


Abbildung 24: Amplitudentest als Schubspannungsfunktion, mit der Nachgebgrenze τ_y und der Fließgrenze τ_f [Mez2010]

Am Beispiel des homogenisierten Klebstoffes 2 ist in Abbildung 25 exemplarisch eine Messung gezeigt. Zur Steigerung der Genauigkeit wurde diese Messung dreimal wiederholt. Es kann eine Viskosität von 20.000 Pas, eine Nachgebgrenze von 20 Pa und eine Fließgrenze von 70 Pa abgelesen werden.

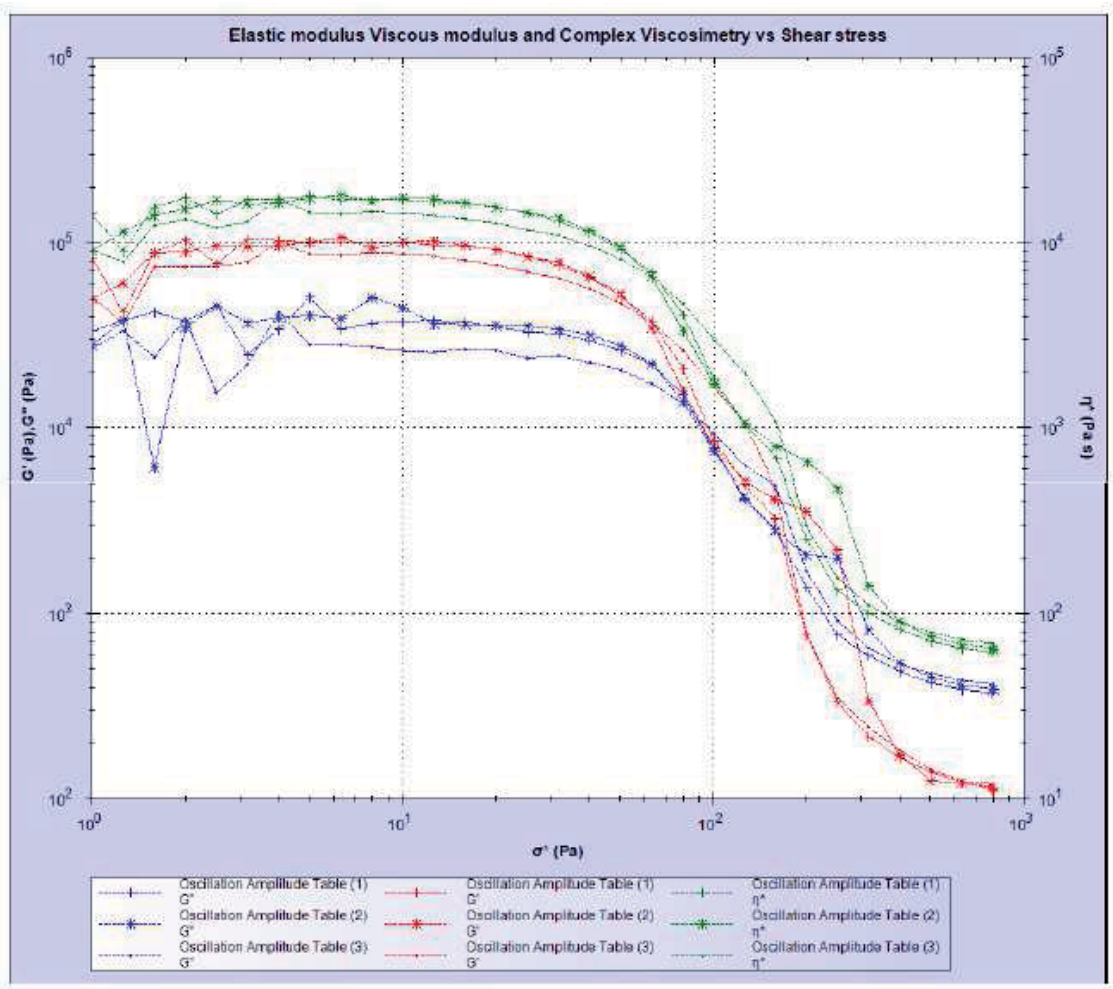


Abbildung 25: Bestimmung der Nachgebgrenze und der Fließgrenze anhand von Klebstoff 2

5.2.3 Mikrofokus-Computertomografie (µCT).

Die Computertomographie ist ein spezielles Röntgenverfahren, das die zerstörungsfreie, berührungslose und dreidimensionale Untersuchung von Objekten ermöglicht.

Die µCT ist die Kombination aus Computertomographie und einer Mikrofokus-Röntgenröhre, die eine Auflösung im Mikrometerbereich ermöglicht. Sie stellt eigentlich eine dreidimensionale Mikroskopie dar, bei der die interne Struktur von Objekten zerstörungsfrei als Bild mit sehr feiner Auflösung dargestellt wird. Das am ifs der TU Braunschweig verfügbare µCT-Gerät v|tome|x s der Firma GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Abbildung 26, wird sowohl für die zweidimensionale als auch dreidimensionale Inspektion eingesetzt.

Abbildung 26: v|tome|x s der Firma GE Sensing & Inspection Technologies GmbH

Die Einsatzmöglichkeiten erstrecken sich von der zerstörungsfreien Prüf- und Messtechnik bis hin zur Geometrierückführung als 3D-CAD-Modell.

5.2.4 Mikroskopie

5.2.4.1 Lichtmikroskop

Für die lichtmikroskopischen Aufnahmen wurde ein binokulares Stereomikroskop Stemi 2000 c der Firma Zeiss mit segmentiert schaltbarer LED-Ringlichtquelle verwendet , Abbildung 27.

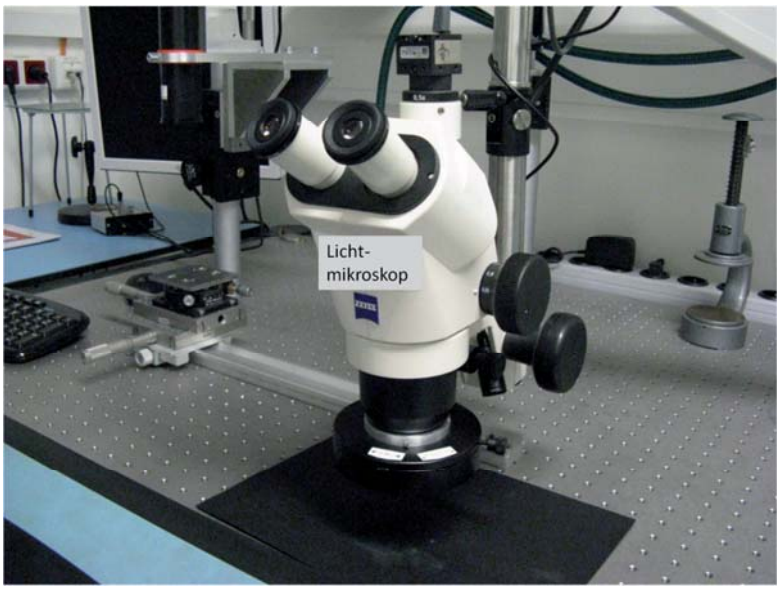


Abbildung 27: Binokulares Stereomikroskop Stemi 2000 c der Firma Zeiss

5.2.4.2 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Die REM-Untersuchungen wurden am ifs mit dem institutseigenen Rasterelektronenmikroskop JSM 6480 der Firma JEOL, Abbildung 28, durchgeführt.

Abbildung 28: Rasterelektronenmikroskop JSM 6480 der Firma JEOL

5.3 Basisuntersuchungen zur Rheologie und zum Verarbeitungspotential der betrachteten Klebstoffe

Zur Auslegung und Auswahl von Versorgungs- und Dosierpumpen (Pumpengröße und –leistung) sowie der richtigen Mischer war es notwendig, die rheologischen Eigenschaften (Viskosität) der einzelnen Klebstoffkomponenten und der gemischten 2K-fvKs zu kennen. Im Weiteren musste der Einfluss der Fasern auf die Viskosität der Einzelkomponenten bzw. des gemischten Klebstoffes untersucht werden, um die Mischreihenfolge bzw. wann und in welche Komponente die Fasern zugemischt werden, zu bestimmen. Die rheologischen Kennwerte des Klebstoffes (Viskosität, Fließgrenze und Nachgebgrenze) mussten dazu mit und ohne Fasern bestimmt werden.

Beim Klebstoff 1 wurden vorab die Fasern in die Harz-Komponente A gemischt.

Tabelle 4 zeigt für Klebstoff 1 den Einfluss des Anteils an Kohlenstofffasern in Komponente A. Es ist deutlich zu erkennen, dass bereits ein kleiner Faseranteil von 4% sowohl die Viskosität als auch die Nachgeb- und Fließgrenze beeinflusst, siehe Pfeile in Tabelle 4.

Tabelle 4: Einfluss des Kohlenstofffaseranteils (CF) in Klebstoff 1 (KS1)

	KS1-A	KS1CF2-A	KS1CF4-A	KS1CF6-A	KS1CF8-A	KS1CF10-A
Viskosität [Pas]	6.000	20.000	100.000	60.000	150.000	180.000
Nachgebgrenze [Pa]	10	15	20	20	30	100
Fließgrenze [Pa]	20	30	100	100	300	400
	KS1-B					
Viskosität [Pas]	5.000					
Nachgebgrenze [Pa]	10					
Fließgrenze [Pa]	20					
	KS1	**KS1CF2**	**KS1CF4**	**KS1CF6**	**KS1CF8**	**KS1CF10**
Viskosität [Pas]	20.000	40.000	100.000	150.000	200.000	200.000
Nachgebgrenze [Pa]	20	20	30	30	200	200
Fließgrenze [Pa]	20	35	100	300	1.500	1.000

Beim Klebstoff 2 wurden die Fasern sowohl in Komponente A (KS2-A) als auch in Komponente B (KS2-B) einformuliert, Tabelle 5 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse. Zu erkennen ist, dass Komponente B mit sehr schnell steigender Viskosität beim Zumischen der Kohlenstofffasern reagiert (Pfeil in Tabelle 5). Die Fließgrenze, also der Bereich, in dem der Klebstoff den Flüssigkeitscharakter erreicht, ist bis 5% Kohlenstofffasern im gemischten Klebstoff gut zu bestimmen und zeigt damit einen sinnvollen Bereich für die Applikationsversuche.

Tabelle 5: Einfluss des Kohlenstofffaseranteils (CF) in Klebstoff 2 (KS2)

	KS2-A	KS2CF1%A	KS2CF2%A	KS2CF3%A	KS2CF4%A	KS2CF5%A
Viskosität [Pas]	3.000	3.000	4.000	4.000	8.000	200.000
Nachgebgrenze [Pa]	3	10	10	5	5	5
Fließgrenze [Pa]	20	30	30	40	70	100

	KS2-B	KS2CF1%B	KS2CF2%B	KS2CF3%B	KS2CF4%B	KS2CF5%B
Viskosität [Pas]	30.000	25.000	200.000	200.000	200.000	200.000
Nachgebgrenze [Pa]	20	20	300	100	100	n.n.
Fließgrenze [Pa]	80	200	n.n.	n.n	n.n	n.n.

	KS2	KS2CF1%	KS2CF2%	KS2CF3%	KS2CF4%	KS2CF5%
Viskosität [Pas]	20.000	20.000	20.000	35.000	150.000	50.000
Nachgebgrenze [Pa]	10	10	10	20	30	30
Fließgrenze [Pa]	90	100	100	150	1.000	200

Die Bestimmung der Fließgrenze der mit Fasern versetzten Komponente B ist bei höheren Faseranteilen nicht mehr möglich, da die Fließgrenze oberhalb des Messbereiches liegt und das Gerät die notwendige Spannung nicht aufbringen kann. Bei einer späteren Dosierung der Komponenten muss also darauf geachtet werden, dass die Viskositäten der beiden Komponenten sich nicht allzu stark unterscheiden. Daraus ergibt sich, dass bei einer automatisieren Applikation der Hauptfaseranteil in Komponente A eingemischt werden sollte. Ein ähnliches Verhalten zeigen auch die Glasfasern (Tabelle 6) und Aramidfasern (Tabelle 7).

Tabelle 6: Einfluss des Glasfaseranteils (GF) in Klebstoff 2 (KS2)

	KS2-A	KS2GF1%A	KS2GF5%A	KS2GF10%A	KS2GF20%A
Viskosität [Pas]	3.000	10.000	20.000	20.000	150.000
Nachgebgrenze [Pa]	3	10	10	100	30
Fließgrenze [Pa]	20	150	90	1.000	300

	KS2-B	KS2GF1%B	KS2GF5%B	KS2GF10%B	KS2GF20%B
Viskosität [Pas]	30.000	20.000	80.000	200.000	200.000
Nachgebgrenze [Pa]	20	40	30	100	100
Fließgrenze [Pa]	80	80	500	n.n	n.n

	KS2	KS2GF1%	KS2GF5%	KS2GF10%	KS2GF20%
Viskosität [Pas]	20.000	15.000	15.000	200.000	400.000
Nachgebgrenze [Pa]	10	10	15	100	500
Fließgrenze [Pa]	90	60	80	n.n	3.000

Tabelle 7: Einfluss des Aramidfaseranteils (AF) in Klebstoff 2 (KS2)

	KS2-A	KS2AF0,5%-A	KS2AF1%-A	KS2AF1,5%-A	KS2AF2%-A
Viskosität [Pas]	3.000	10.000	20.000	40.000	150.000
Nachgebgrenze [Pa]	3	10	10	20	100
Fließgrenze [Pa]	20	150	150	200	n.n

	KS2-B	KS2AF0,5%-B	KS2AF1%-B	KS2AF1,5%-B	KS2AF2%-B
Viskosität [Pas]	30.000	40.000	40.000	200.000	300.000
Nachgebgrenze [Pa]	20	20	30	30	100
Fließgrenze [Pa]	80	100	100	n.n	n.n

	KS2	KS2AF0,5%	KS2AF1%	KS2AF1,5%	KS2AF2%
Viskosität [Pas]	20.000	30.000	35.000	40.000	70.000
Nachgebgrenze [Pa]	10	20	25	20	30
Fließgrenze [Pa]	90	100	100	250	n.n

Ähnlich wie bei der Untersuchung von Klebstoff 2 wurde bei Klebstoff 3 der Einfluss eines zusätzlichen Fasergehaltes sowohl auf die Komponente A als auch auf die Komponente B untersucht. Der Faseranteil ist im originalen Klebstoff relativ klein; eine Erhöhung des Füllgrades sollte den Fasereinfluss auf die rheologischen und abrasiven Eigenschaften verdeutlichen.

In Tabelle 8 sind die Einflüsse des Glasfaseranteils auf die einzelnen Komponenten sowie auf den homogenisierten Klebstoff dargestellt.

Tabelle 8: Einfluss des Glasfaseranteils in Klebstoff 3

	KS3-A	KS3-A 5% GF	KS3-A 10% GF
Viskosität [Pas]	3.000	10.000	20.000
Nachgebgrenze [Pa]	3	10	10
Fließgrenze [Pa]	20	150	150

	KS3-B	KS3-B 5% GF	KS3-B 10% GF
Viskosität [Pas]	30.000	40.000	40.000
Nachgebgrenze [Pa]	20	20	30
Fließgrenze [Pa]	80	100	100

	KS3	KS3 5% GF	KS3 10% GF
Viskosität [Pas]	20.000	30.000	35.000
Nachgebgrenze [Pa]	10	20	25
Fließgrenze [Pa]	90	100	100

5.4 Mechanische Charakterisierung der modifizierten Klebstoffe

5.4.1 Ermittlung von Zugfestigkeit und E-Modul

Ausgehend von den mechanischen Kennwerten, die in den Herstellerdatenblättern oft nur unzureichend dargestellt sind, wurden eigene experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Materialparameter der Klebstoffe durchgeführt. Die bei den Versuchen experimentell ermittelten Materialkennwerte dienten als Grundlage für numerische Untersuchungen, bei denen das mechanische Tragverhalten unterschiedlicher Faser- Klebstoffverbindungen analysiert werden sollte.

Zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der modifizierten Klebstoffe wurden Substanzproben in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4 hergestellt und geprüft, Abbildung 18. Aus diesen Proben wurden Werte für E-Modul und Zugfestigkeit ermittelt.

Beim unmodifizierten Klebstoff 1 konnten die Angaben des Herstellers bezüglich E-Modul und Festigkeit in etwa bestätigt werden, Abbildung 29. Beim unmodifizierten Klebstoff 2 gilt dies nur für die Zugfestigkeit. Der E-Modul, welchen der Hersteller mit 11000 N/mm² angibt, wurde mit maximal knapp über 8000 N/mm² bestimmt, Abbildung 30.

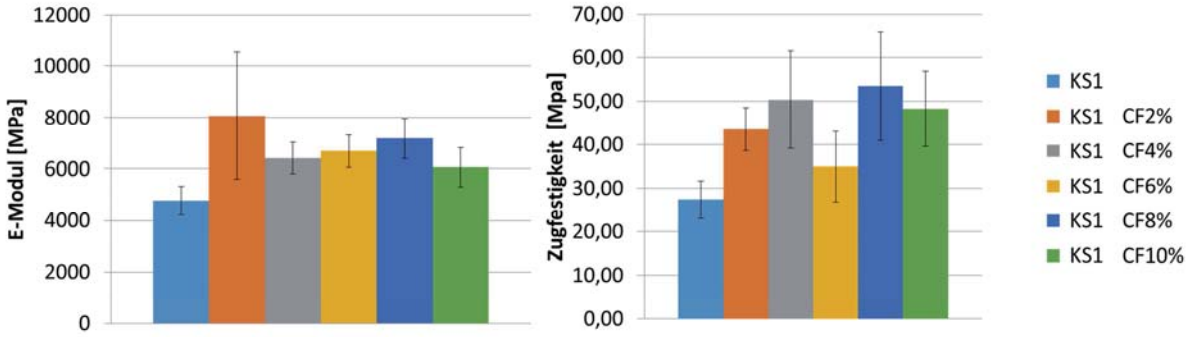


Abbildung 29: Zugfestigkeit und E-Modul von Klebstoff 1

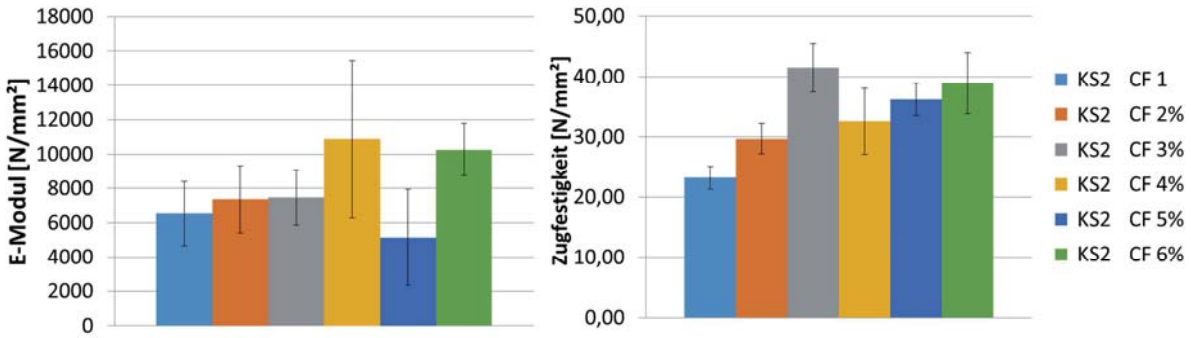


Abbildung 30: Zugfestigkeit und E-Modul von Klebstoff 2

Durch die Zumischung von Kohlenstofffasern lässt sich die Zugfestigkeit nahezu verdoppeln, Abbildung 29 und Abbildung 30. Bei 3% Masseanteil der Kohlenstofffasern steigt die mittlere Zugfestigkeit auf 41 N/mm². Ein höherer Faseranteil kann die Festigkeit dann nicht mehr signifikant steigern.

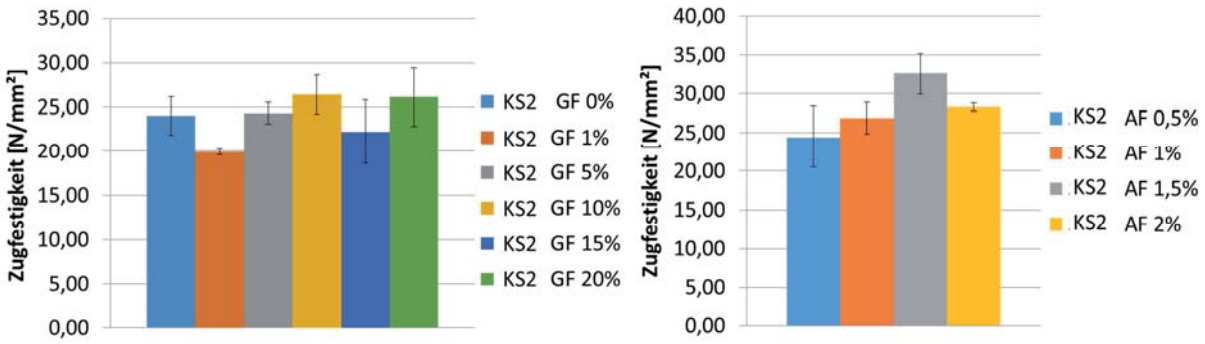


Abbildung 31: Zugfestigkeit von Klebstoff 2 mit Glasfasern (GF) und Aramidfasern (AF)

Die Ergebnisse für die mit Glasfasern modifizierten Klebstoffe zeigen, dass die Glasfasen zu keiner nennenswerten Steigerung der Zugfestigkeit führen, Abbildung 31. Die Festigkeit liegt bei allen Anteilen in etwa im Bereich des unmodifizierten Materials. Dies liegt daran, dass die Glasfasern trotz ihrer Silanschlichte keine ausreichende Adhäsion zum Klebstoff aufbauen. Die Aramidfasern mit einem Massenanteil von 1,5% bewirken eine Steigerung der Zugfestigkeit um ca. 10N/mm² im Vergleich zum unmodifizierten Klebstoff. Weitere Faseranteile lassen die Festigkeit sinken. Der Grund dürfte eine Überfüllung des Klebstoffes mit Aramidfasern sein, die eine Schwächung der Faser-Matrix hervorruft. Ein ähnlicher Grund könnte bei den Kohlenstofffaseranteilen über 3% vorliegen.

Deutlich zeigt sich der Einfluss von Füllstoffen auf den E-Modul. Der Füllstoff Quarzsand alleine reicht aus, um den E-Modul auf bis zu 8000 N/mm² anzuheben. Alle Faserarten sind in der Lage, den mittleren E-Modul auf bis zu 11000 N/mm² zu steigern. Einzelne Glas- bzw. Kohlenstofffaserverstärkten Proben erzielten sogar ein E-Modul von über 16000 N/mm² - allerdings mit einer enormen Streuung. Die Ursache für diese Streuung liegt in der Herstellungsmethode der Proben. Das Einbringen der Fasern verursacht eine deutliche Erhöhung der Viskosität des gemischten Klebstoffs. Ein gleichmäßiges Homogenisieren ist dann nur sehr schwer möglich. In Teilen der Proben konnte optisch eine nicht ausreichende Durchmischung der Komponenten erkannt werden, die sicherlich zu den Streuungen geführt hat. Des Weiteren erfolgte die Anlieferung der Glasfasern in Bündeln, welche aus vielen Einzelfasern bestehen. Das Aufbrechen dieser Bündel erfordert eine gewisse mechanische Energie, die nicht immer zur Homogenisierung des Klebstoffes eingebracht werden konnte.

Bei der Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften des mit 10% Glasfasern gefüllten Klebstoffes 3 konnte eine maximale Zugfestigkeit von 60 MPa sowie ein E-Modul von etwa 3800 MPa gemessen werden. Abbildung 32 zeigt den Spannungs-

Zeit Verlauf der getesteten Zugproben. Die Proben M6, M9 und M10 zeigten bei der anschließenden Bruchflächenuntersuchung ausgeprägte Lunker, welche zu einem auffallenden Verlust der Endfestigkeit führten, siehe auch Kapitel 5.5.2. Dies zeigt, dass bei einer Automatisierung besondere Aufmerksamkeit auf die homogene luftporenfreie Applikation gelegt werden muss.

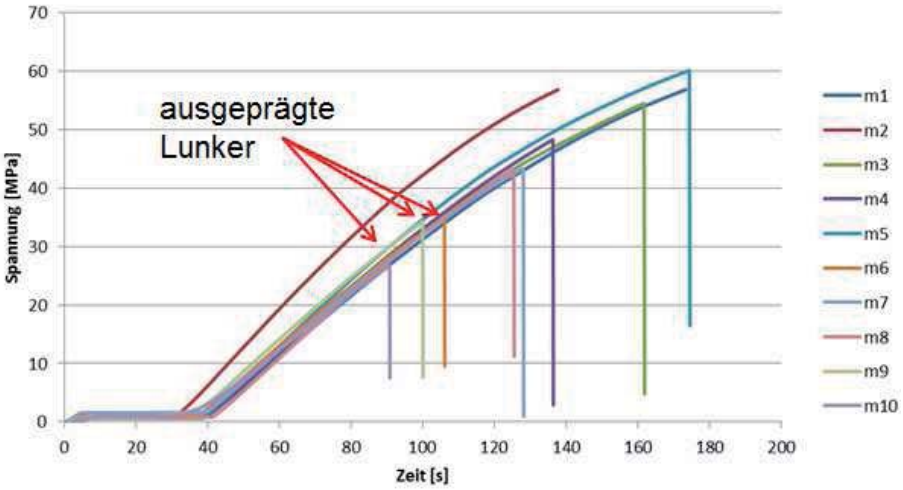


Abbildung 32: Spannungs-Zeit Verlaufskurve der Zugproben von Klebstoff 3

5.4.2 Zug-Scher-Festigkeiten

Im Projektverlauf wurde die Notwendigkeit der Untersuchung der Zug-Scher-Festigkeit der fvK erforderlich, da dadurch eine Aussage bezüglich der Anbindung der Klebstoffe an Aluminium-Eckprofile erwartet wurde, vgl. Kapitel 5.7.

In Abbildung 19 ist der Aufbau der Zug-Scher-Proben nach DIN EN 1465 dargestellt.

Abbildung 33 zeigt zwei Proben aus den durchgeführten Tests

Abbildung 33: Zug-Scher-Versuchsproben vor (links) und nach (rechts) der Prüfung

Für diese Versuche wurden drei verschiedene fvKs verwendet: Klebstoff 3 ohne weitere Modifikation, Klebstoff 2 mit 1,5 % Kohlenstofffasern und der unmodifizierte Klebstoff 2. Als Substrat wurde Aluminium ohne besondere Oberflächenbehandlung verwendet. Die höchste Festigkeit konnte bei Klebstoff 3 mit 9,0 MPa erreicht werden. Die Zugscherfestigkeiten des unmodifizierten Klebstoff 2 und von Klebstoff 2 mit 1,5 % KF waren mit 4,1 MPa und 3,5 MPa weitaus geringer.

Bei allen drei Klebstoffen war adhäsives Versagen das Abbruchkriterium für die Versuche. Eine Vorbehandlung zur Optimierung der adhäsiven Anbindung war nicht erwünscht, da sie nicht dem Anwendungsfall entspräche. Somit konnte nach diesen Versuchen keine Aussage über die inneren Festigkeiten der fvKs getroffen werden.

5.5 Bruchflächenanalyse und Identifizierung der Klebstoffmatrix

5.5.1 Optimierungspotential durch Variation von Klebstoffen und Fasern

Ausgehend von den aus der bisherigen Forschung an 2K-fvKs ermittelten mechanischen Kennwerten sollte der Einfluss unterschiedlicher Faserarten- und -längen auf mechanische Eigenschaften bei der erarbeiteten Applikationsmethode experimentell quantifiziert werden. Die experimentellen Untersuchungen wurden durch Struktursimulationen unter diskreter Modellierung der Fasern unterstützt. Die experimentelle Untersuchung von Bruchflächen mittels REM gab Aufschluss bezüglich des Optimierungspotenzials der Faser-Klebstoff-Verbindung. In bisherigen Untersuchungen wurde dabei oft ein Versagen in der Adhäsionsschicht zwischen Faser und Klebstoff ermittelt. Die Fasern wurden als Folge des Adhäsionsbruchs anschließend aus dem Klebstoff herausgezogen, Abbildung 34.

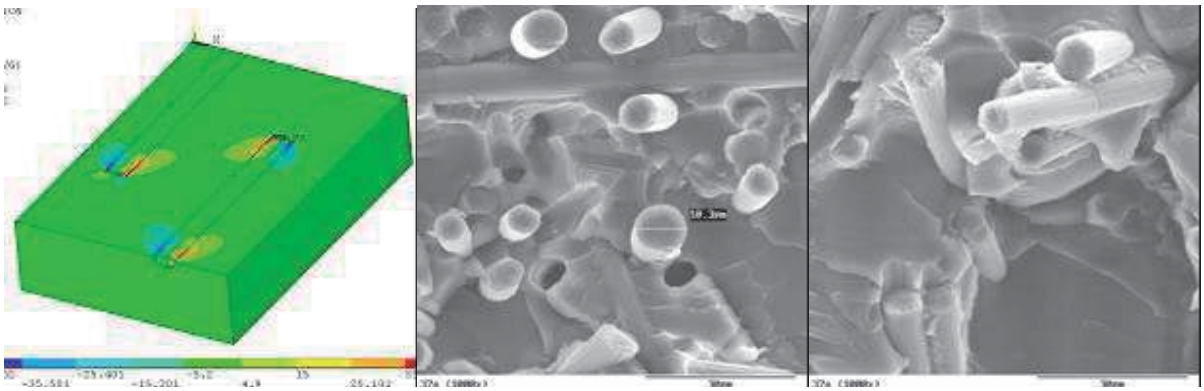


Abbildung 34: links: Ergebnis einer numerische Analyse der Kraftübertragung zwischen Klebstoff und Fasermaterial - Auswertung der Schubspannungen τ in [N/mm²]; rechts: Aufnahmen des Zustandes der Faser-Klebstoffmatrix nach einem Bruch im Zugversuch

Die Bruchflächenanalyse bietet die Möglichkeit, den Einfluss unterschiedlicher Faserschlichten, Mischparameter und Aushärtebedingungen auf das Verformungsverhalten und die Bruchentwicklung zu untersuchen und letztendlich eine optimale Kombination aus Werkstoff und Verarbeitungsparametern zu ermitteln. Ein wesentliches Ziel war die Optimierung der Faser- Klebstoff-Kombination und -verarbeitung hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften des Faser- Klebstoff-Verbundwerkstoffs. Weiterhin sollten die Adhäsionseigenschaften des Faser- Klebstoff-Verbundmaterials an verschiedenen Oberflächen mittels zerstörenden Bruchversuchen und anschließender REM Analyse untersucht werden.

5.5.2 Bruchflächenanalyse der Zugversuche

Die in Kapitel 5.4.1 durchgeführten Zugfestigkeitsprüfungen zeigten ein ausgesprochen sprödes Bruchverhalten. Um ein genaueren Einblick in den Versagensmechanismus zu erlangen und damit auch eine gewisse Aussage über die Versagenswahrscheinlichkeit bestimmter Belastungszustände zu erhalten, wurden umfangreiche optische Analysen an der Bruchflächen und Oberflächen durchgeführt. Es wurden ne-

ben makroskopischen Sichtprüfungen auch mikroskopische Analysen mittels Mikroskop, µ-CT sowie REM durchgeführt.

Bereits bei der Betrachtung der Bruchflächen mit bloßem Auge konnten markante Eigenschaften für einzelne Faserbestandteile erkannt werden. Abbildung 35 bis Abbildung 37 zeigen die Proben des Klebstoffes 2 mit unterschiedlichen Konzentrationen der verschiedenen Fasern.

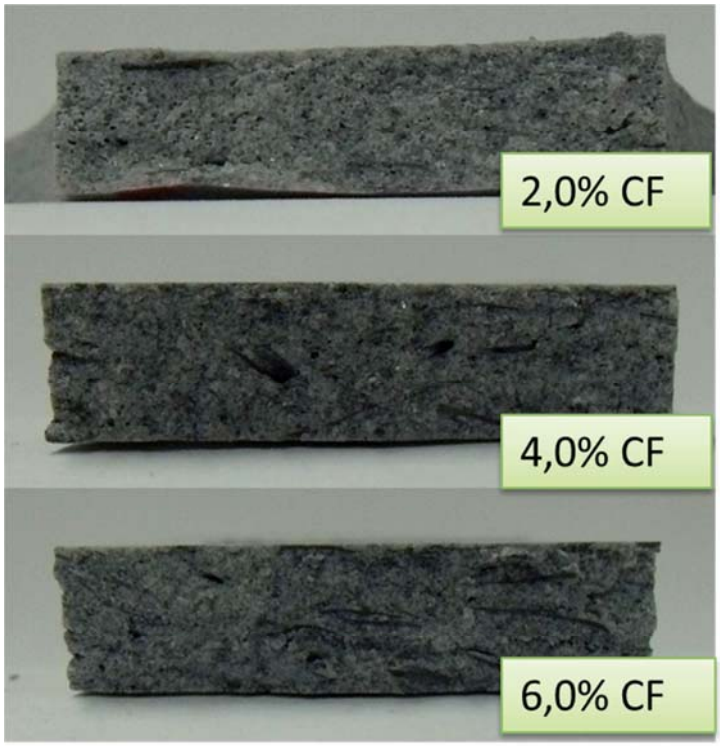


Abbildung 35: Bruchbilder nach Zugprüfungen an Klebstoff 2 mit unterschiedlichen Anteilen an Kohlenstofffasern (CF)

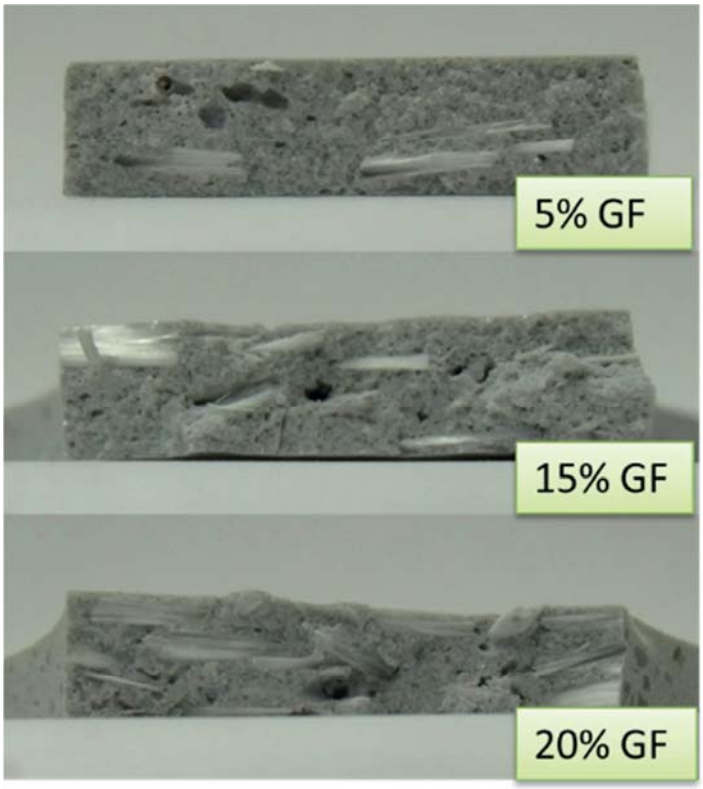


Abbildung 36: Bruchbilder nach Zugprüfungen an Klebstoff 2 mit unterschiedlichen Anteilen an Glasfasern (GF)

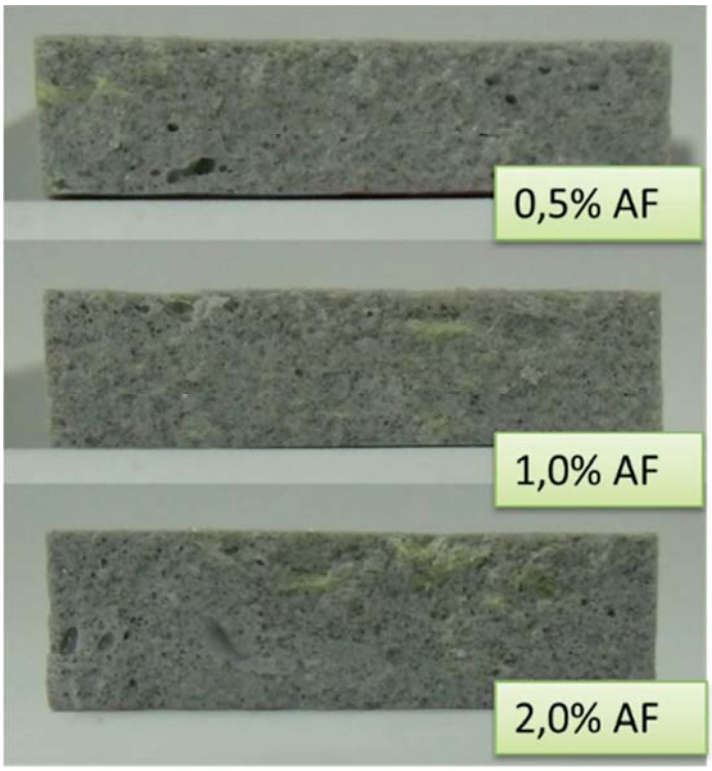


Abbildung 37: Bruchbilder nach Zugprüfungen an Klebstoff 2 mit unterschiedlichen Anteilen an Aramidfasern (AF)

Bei den mit Glasfasern modifizierten Proben zeigt sich, dass die zugemischten Glasfaserbündel durch den Homogenisierungsvorgang nicht separiert werden konnten. Dies bestätigten auch die REM-Aufnahmen in Abbildung 38. Die Untersuchung der Bruchflächen zeigte Glasfasern, die aus der Klebstoffmatrix herausgezogen waren (Pfeil), was eine unzureichende Anbindung der Faser in die Matrix bedeutet. Aufgrund dieser Ergebnisse konnten auch die Annahmen aus den Belastungstests bestätigt werden.

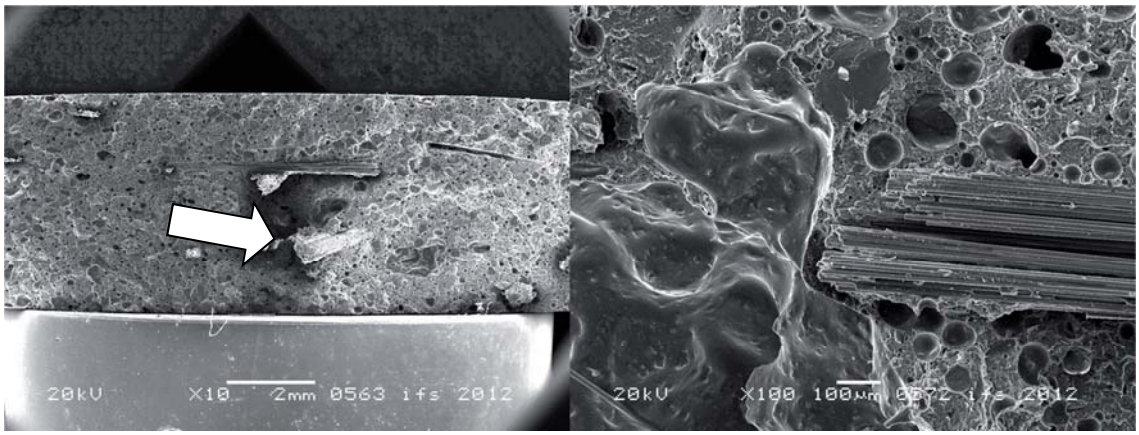


Abbildung 38: REM Aufnahmen von Klebstoff 2 mit Glasfasern

Im Gegensatz zu den Glasfasern konnten bei der Zugabe von Aramidfasern homogene Klebstoff-Faser-Mischungen hergestellt werden, Abbildung 39.

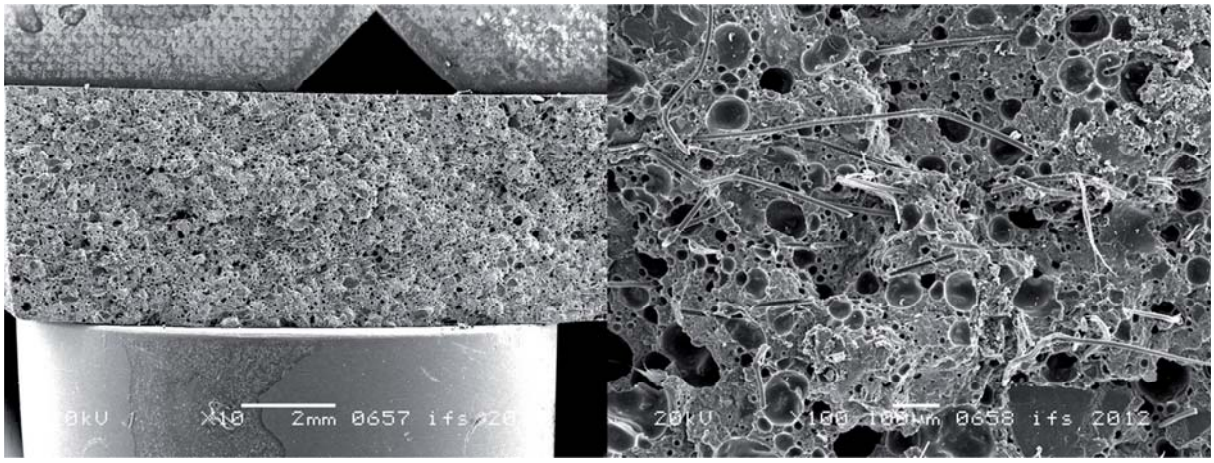


Abbildung 39: REM Aufnahmen von Klebstoff 2 mit 1% Aramidfasern

Bei Fasergehalten größer 2% war jedoch eine ungleichmäßige Homogenisierung und eine leichte Netzbildung feststellbar. Die REM-Aufnahmen, Abbildung 40, zeigen, dass die Homogenisierung keine Schäden an den Fasern verursacht hat. Faserschädigungen waren nur an der Bruchfläche der Zugproben festzustellen.

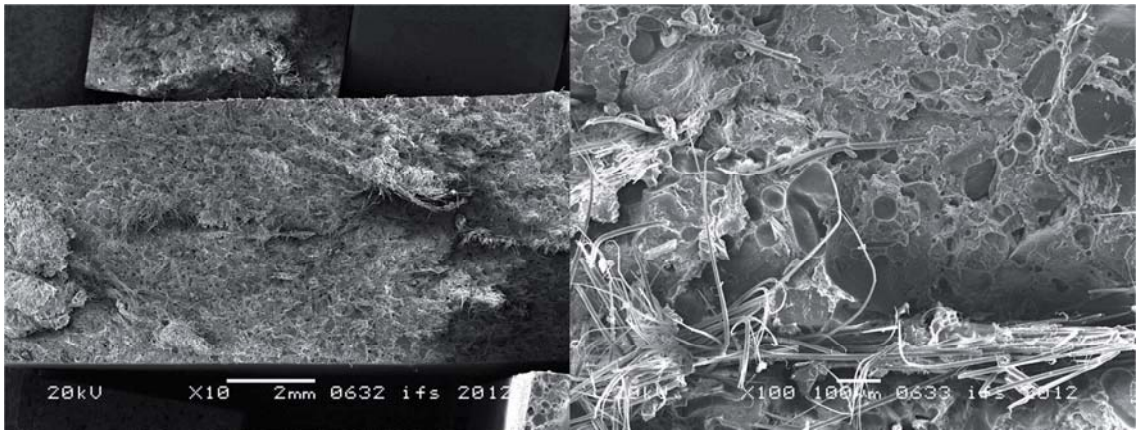


Abbildung 40: REM Aufnahmen von Klebstoff 2 mit 2% Aramidfasern

Die besten Ergebnisse hinsichtlich einer homogenen Faserverteilung lieferten die Kohlenstofffasern. Neben der guten Einbindung der Fasern in die Klebstoffmatrix konnten kaum Schädigungen der Fasern durch die Homogenisierung festgestellt werden. Die REM-Aufnahmen , Abbildung 41, dokumentieren die gute Einbindung der Fasern in die Matrix.

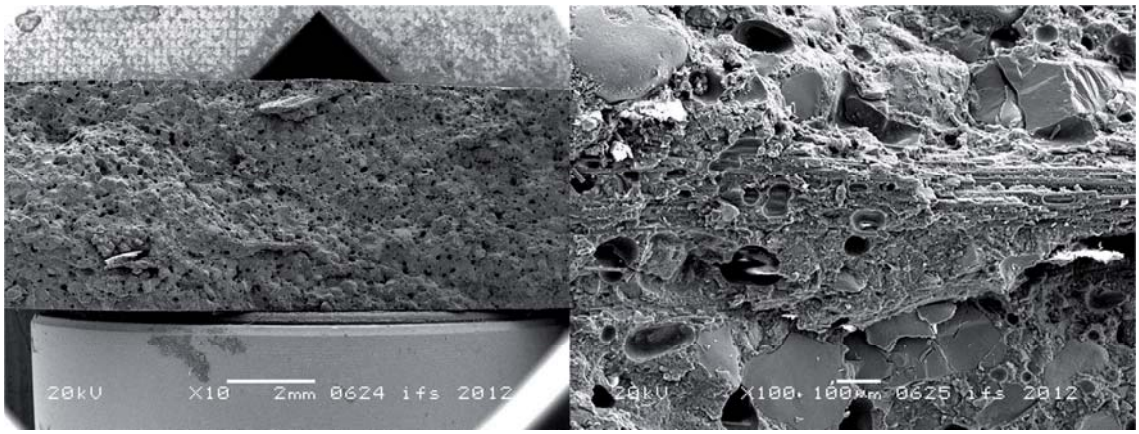


Abbildung 41: REM Aufnahmen von Klebstoff 2 mit 4% Kohlenstofffasern

Eine Nestbildung war jedoch auch hier bei mehr als 3% Faseranteil zu beobachten.

5.5.3 Homogenisierungsfehler

Neben der Charakterisierung der einzelnen Merkmale des Faserverbunds konnten auch Fehlstellen identifiziert werden, welche zum einen aus der Faserart und der Applikation herrührten und zum anderen aus dem verwendeten Verfahren zur Homogenisierung der fvK.

Für die Homogenisierung wurden Rührwerke benutzt, die sowohl die zwei Komponenten der verwendeten Klebstoffe als auch die einzubringenden Fasern miteinander mischen sollten. Aufgrund der hohen Viskosität der Klebstoffe und dem Umstand,

dass ein offenes Mischverfahren verwendet wurde, konnte die Bildung von Lufteinschlüssen nicht vermieden werden. Abbildung 42 zeigt Beispiele dieser Luftporen, die bei ausreichender Größe auch einen deutlichen Einfluss auf die Festigkeit haben können.

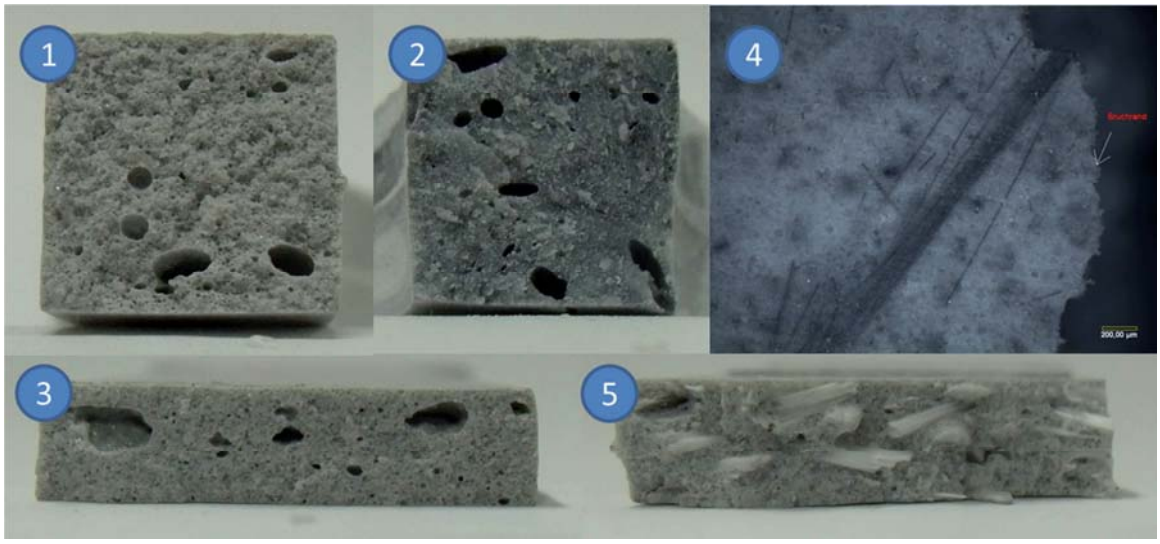


Abbildung 42: Fehlstellenbildung bei der Herstellung der fvKs, 1-3: Luftporen, 4: Nestbildung, 5: nicht aufgebrochene Faserbündel

Ein weiteres Problem bei der Herstellung der Probekörper war die Nestbildung, Abbildung 42. Für die Einmischungen der unterschiedlichen Fasern wurden zum Teil vorpräparierte Faserbündel verwendet, welche beim jeweiligen Homogenisierungsvorgang aufgebrochen und in ausreichendem Maße verteilt werden mussten. Dies gelang bei den Mischvorgängen nicht in allen Fällen in der gewünschten Qualität.

5.6 Entwicklung einer Misch- und Applikationseinheit und einer Prozesskette

5.6.1 Pumpversuche

In enger Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des PA wurde nach möglichen vorhandenen Mischtechnologien gesucht, welche für die hohe Viskosität der untersuchten Klebstoffe ausgelegt sind. Ziel war es, eine Aussage über die Mischbarkeit der untersuchten 2K-fvKs treffen zu können.

Hierfür wurden im Hause der Firma Reinhardt-Technik GmbH Pumpversuche mit *KS2 1,5%CF* durchgeführt. Zur Verwendung kam eine Pumpe des Typs Visco Star 20 mit einem Übersetzungsverhältnis von 52:1 (Abbildung 5). Diese Pumpe arbeitet zuverlässig bei einem Luftdruck zwischen 4-6 bar. Tabelle 9 zeigt, welche Fördermengen mit einem bestimmten Luftdruck erreicht werden konnten.

Abbildung 43: Pumpe des Typs Visco Star 20, Reinhardt Technik GmbH

Tabelle 9: Fördermengen der Visko Star 20

Verwendeter Luftdruck	Fördermenge
4 bar	230 g/min
5 bar	390 g/min
6 bar	520 g/min

Das Material wies nach dem Pumpen eine außergewöhnlich dunkle Farbe auf. In den vorangegangenen Mischungen, welche zur Herstellung der Probekörper aus Abschnitt 5.2 in einem offenen System gemischt wurden, war das Mischergebnis optisch deutlich heller. Dies lässt darauf schließen, dass Fasern während des Pumpvorgangs

gebrochen sind. Aussagen zur Verschleißfestigkeit der Anlage konnten während dieser Versuche noch nicht getroffen werden, da die dosierte Menge zu gering war.

Eine SingleFlow-Anlage mit einem Übersetzungsverhältnis von nur 13:1 konnte auch bei 8 bar Luftdruck keine zuverlässigen Dosierergebnisse liefern.

5.6.2 Schädigungen von Klebstoff und Faser

Für die Beurteilung der Faserschädigung sowie des Einflusses auf die Anlagentechnik waren gezielte Pumpversuche notwendig. Für den Klebstoff 3 konnten bereits durch die Fassabfüllung beim Hersteller Faserschädigungen festgestellt werden, Abbildung 44. Diese Schädigungen sind vermutlich beim Abfüllen der Masse mittels Zahnradpumpen in 200l-Fässern entstanden. Die Faserlänge variierte zwischen 0,2 mm und 2,08 mm.

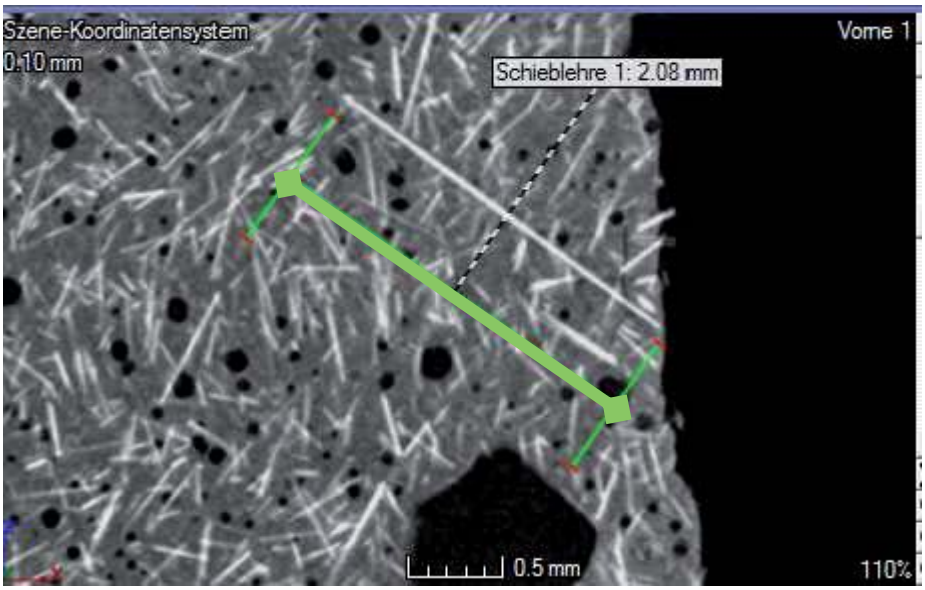


Abbildung 44: Klebstoff 3, Faserschädigung nach Pumpversuch, µ-CT-Aufnahme

Die Applikation des Klebstoffes 3 durch einen Statikmischer mit 2mm Öffnung führte zu keiner weiteren Schädigung des Fasern, Abbildung 45. Es finden sich nach wie vor Fasern im Bereich von 2mm Länge.

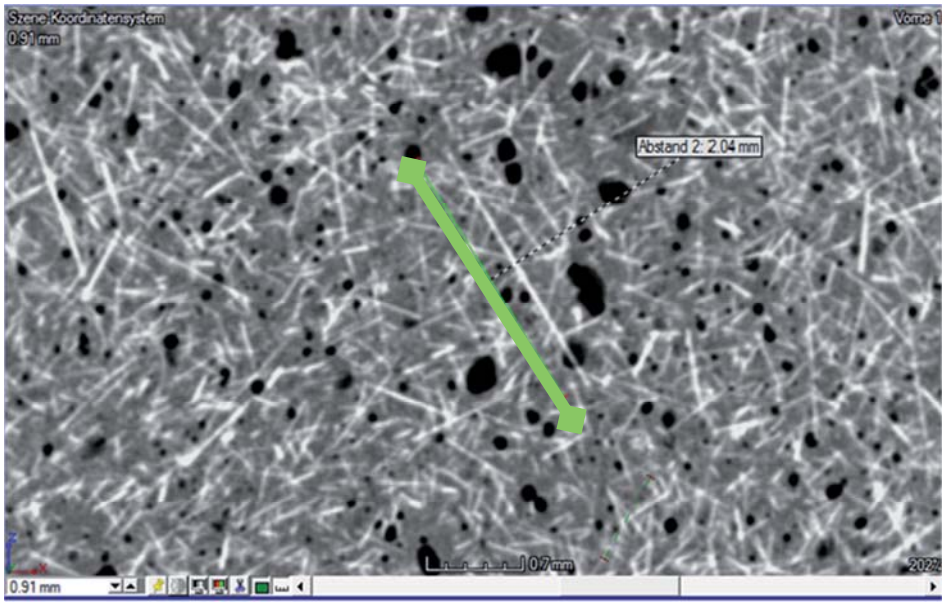


Abbildung 45: Klebstoff 3, nach der Dosierung durch eine 2mm Öffnung, µ-CT Aufnahme

Für Klebstoff 2 mit 5%Glasfaseranteil *KS2 5%GF* bzw. 1,5% Kohlenstofffaseranteil *KS2 1,5%CF* ergab sich ein vergleichbares Bild. Die Faserlänge entspricht den Herstellerangaben, auch nach der Dosierung durch einen Statikmischer. Bei den zugemischten Glasfasern war jedoch deutlich erkennbar, dass die Rovings nicht aufgebrochen wurden, Abbildung 46.

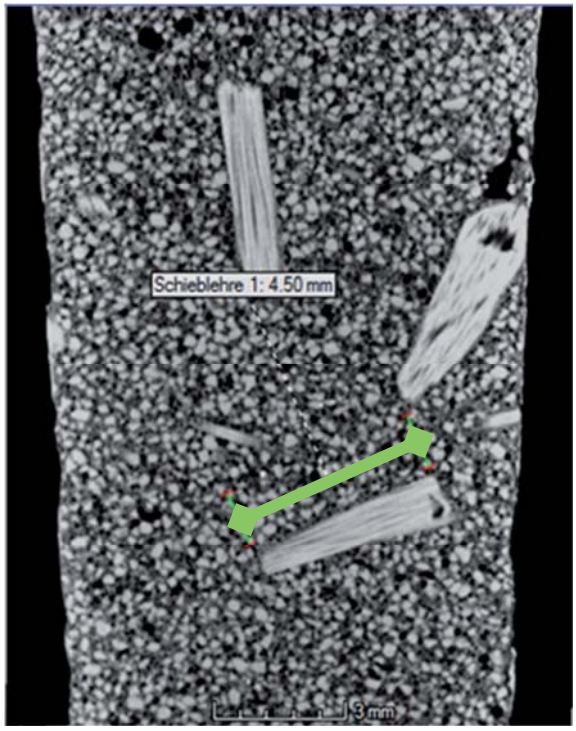


Abbildung 46: Klebstoff 2 mit 5% Glasfaseranteil, nach der Dosierung durch eine 2mm Öffnung, µ-CT-Aufnahme

5.6.3 Schädigungen der Anlagentechnik

Mittels einer doppelt wirkenden Kolbenpumpe (Single Flow 20, Firma Reinhardt-Technik) wurden ca. 10.200 Liter des mit 1,5% Kohlenstofffasern angereicherten Klebstoff 2 im Kreislauf gepumpt. Dies entspricht etwa 120.000 Doppelhüben.

Zu Beginn der Untersuchungen ließ sich das Material nur schwer pumpen. Die Pumpe wurde im Aufwärtshub nicht richtig gefüllt und fiel im Abwärtshub durch, was ein langsames und undefiniertes Fördern zur Folge hatte. Die Fasern wurden beim Durchgang durch die Pumpe gebrochen; dies konnte bei weiteren Pumpdurchgängen durch die farbliche Änderung des Gemisches beobachtet werden. Bereits nach 200 Hüben war die Materialprobe deutlich heller, die Probe insgesamt niedrigviskoser. Nach 1500 Doppelhüben war die Pumpe fast vollständig gefüllt. Eine Beeinträchtigung des Fußventils aufgrund des Quarzsandes war nicht auszuschließen. Nach 120.000 Doppelhüben musste der Versuch abgebrochen werden, da die Pumpe nicht mehr förderte und defekt war.

Es wurde deutlich, dass der sowohl mit Kohlenstofffasern als auch mit Quarzsand gefüllten Klebstoff 2 deutlichen Einfluss auf die Wartungsintervalle der Dosieranlagen hat. Bei der anschließenden Beurteilung der Pumpe durch die Firma Reinhardt Technik GmbH wurden Schäden an Schöpfstange, Fußventil und Dichtungen erkannt.

Die Konstruktion der Pumpe müsste für diese stark abrasiven Medien Verstärkungen für die flüssigkeitsbenetzten Oberflächen erhalten. Die Verschleißteile wie Ringe, Buchsen, Scheiben, Gehäuseeinsätze sowie alle Arten von Auskleidungen sollten leicht ausgetauscht werden könnten. Sie müssen dabei verhältnismäßig preiswert sein und aus Werkstoffen bestehen, die besonders widerstandsfähig gegen Abrasion sind.

Zudem wäre eine regelmäßige Nachjustierung des Misch-Ventils notwendig.

Möglichst kurze Leitungen und große Querschnitte werden zudem als Optimierung gegen einen schnellen Verschleiß angesehen.

Weiterführende Informationen wurden nach den Dauerversuchen vom Projektpartner nicht zur Verfügung gestellt.

5.6.4 Optimierung der Prozesstechnik

In verschiedenen Optimierungsschritten konnte gezeigt werden, dass die Dosieranlagentechnik durch geeignete Materialauswahl und Auslegung der Bauteile (Leitungslänge, Leitungsquerschnitt, Kolbengröße) gut in der Lage ist, die modifizierten Klebstoffsysteme aus Fässern zu dosieren. Mittels dynamischen Statikmischern konnten auch mit Kohlenstofffasern gefüllte Klebstoffsysteme mit einem Volumenstrom von bis zu 15 kg/min erfolgreich homogenisiert und dosiert werden.

Die Dosierung und Homogenisierung von kleinen Mengen 2K-fvKs wurde mit 2K-Doppelkartuschen und Statikmischern durchgeführt (Abbildung 47). Für die Versuche wurde die Komponente A mit Kohlenstofffasern versetzt, da diese eine geringere Viskosität als Komponente B aufwies (siehe Kapitel 5.3). Als Kartuschen wurden 385ml ZKK-Kartuschen des Herstellers Ritter GmbH ausgewählt (Mischungsverhältnis 3:1). Der verwendete Statikmischer besaß eine Länge von 20 cm, 19 mm Durchmesser und 10 Mischelemente. Klebstoff 2 konnte nicht optimal dosiert werden, da die Kohlenstofffasern den Ausgang des Statikmischers verstopfen. Abhilfe schaffte hier die Verwendung von größeren Statikmischern mit einer größeren Austrittsöffnung (>3 mm). In einem weiteren Optimierungsschritt konnte Klebstoff 3 mit 450 ml ZKK Kartuschen (Mischungsverhältnis 2:1) mit den gleichen Statikmischern erfolgreich gemischt werden. Sowohl pneumatische als auch handgetriebene manuelle Dosierer konnten diesen Klebstoff erfolgreich homogenisieren und anschließend dosieren.

Abbildung 47: 2K-Doppelkartusche mit Statikmischrohr

Eine weitere Variante, mit welcher teilweise die untersuchten Probekörper hergestellt wurden, bestand darin, den 2K-fvK in einem offenen Mischer mit all seinen Bestandteilen zu homogenisieren und anschließend in Eurokartuschen abgefüllt zu applizieren. Der Nachteil dieser Variante ist die Luftporenbildung durch den Mischprozess sowie die zu beachtende Topfzeit.

.

5.7 Anwendungsorientierter Technologieeinsatz

5.7.1 Praxisnahe Anwendung

Für den praxisorientierten Einsatz des 2K-fvKs wurde speziell mit dem PA Mitglied Schüco International KG zusammengearbeitet. Hierfür wurden in den Räumlichkeiten von Schüco Fenster und Rahmenprofile mit ausgewählten 2K-fvKs geklebt und anschließend hinsichtlich ihrer Tragwirkung untersucht.

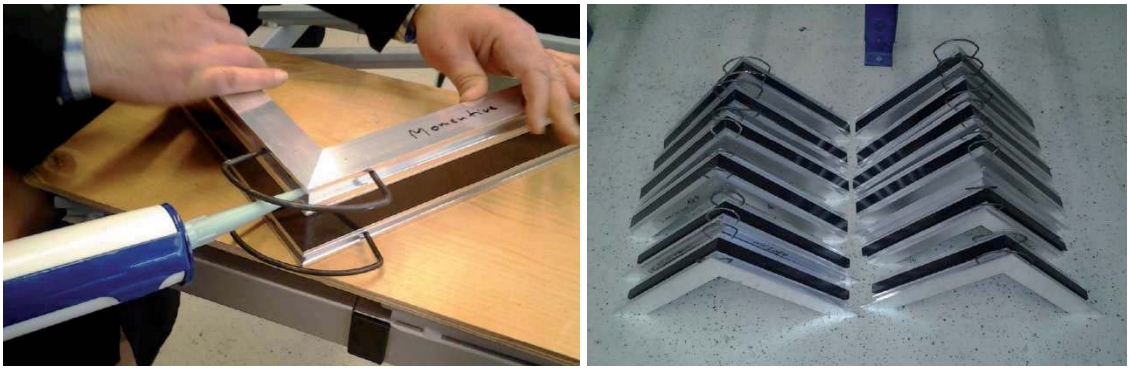


Abbildung 48: Klebung von Profilecken (links), geklebte Profilecken (rechts)

Wie in Abbildung 48 dargestellt, wurden die Eckverbindungen mittels Euro-Kartuschen geklebt. In diese wurde der zuvor homogenisierte Klebstoff abgefüllt. Die Einfüllöffnung in den Profilen hatte einen Durchmesser von 5 mm und die Öffnung der Kartusche lediglich 3 mm. Die Dosierung selbst wurde mittels pneumatischem Eurokartuschendosierer realisiert.

Für die Versuche wurde ein Kohlenstofffaserverstärkter Klebstoff 2 und der mit Glasfasern modifizierte Klebstoff 3 verwendet. Mit Klebstoff 2 konnte lediglich eine mit 1% Kohlenstofffaser versetzte Mischung appliziert werden. Die Mischungen mit höherem Kohlenstofffaseranteil konnten aufgrund der kleinen Spritzenöffnung von 3 mm nicht in ausreichender Qualität eingebracht werden. Der Klebstoff 3 hingegen war problemlos in die Profile zu füllen.

Durch das Vorgehen waren Lufteinschlüsse im Klebstoff nicht zu vermeiden, Abbildung 49. Mittels µ-CT konnte gezeigt werden, dass sich die Fasern im Klebstoff in Applikationsrichtung ausrichten.

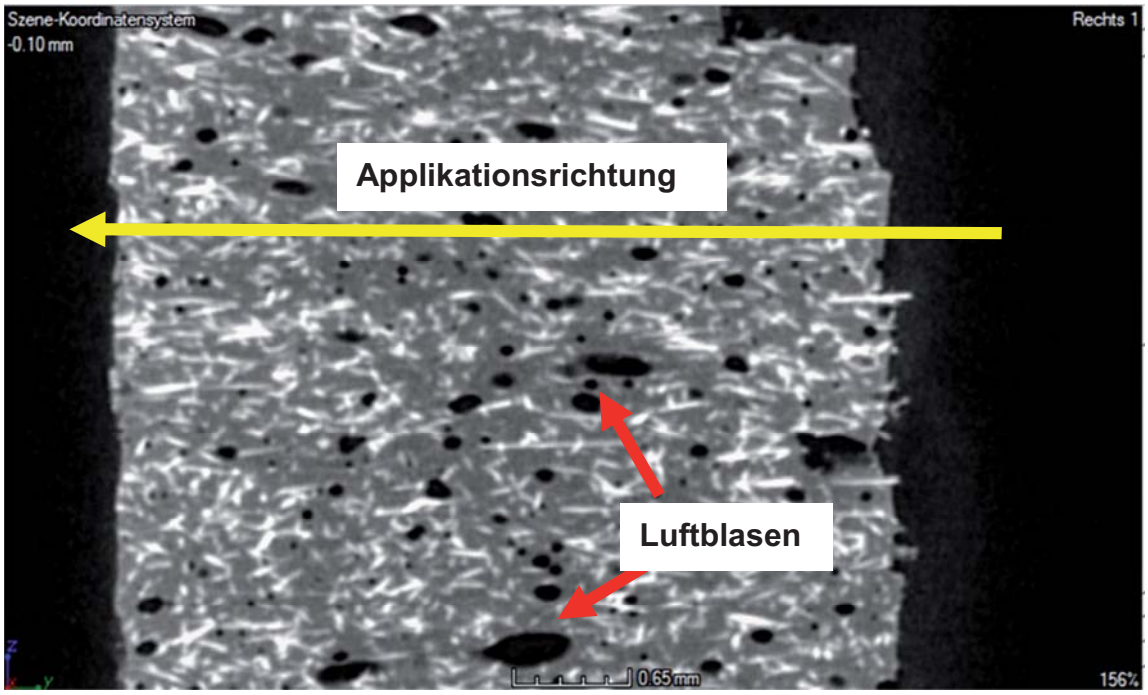


Abbildung 49: Klebstoff 3, Ausrichtung der Fasern in Applikationsrichtung, µ-CT-Aufnahme

Die anschließende Untersuchung der Profilecken zeigte teilweise eine unzureichend homogene Ausbreitung des Klebstoffes. In den Belastungstest konnten ausreichende Steifigkeiten erreicht werden, jedoch lag die Endfestigkeit unterhalb der Festigkeit des von SCHÜCO verwendeten Systems.

5.7.2 Untersuchungen an Aluminium-Eckprofilen

Um eine genauere Aussage das Versagen sowie den Einfluss der Profilquerschnitte geben zu können, wurden umfangreiche Untersuchungen an Aluminium-Eckprofilen unterschiedlicher Größe durchgeführt, Abbildung 50.

Bei der Herstellung dieser Proben wurde der Klebstoff über Einspritzöffnungen im Bereich der Ecke appliziert (Abbildung 50 – unten) und über Sichtprüfung sichergestellt, dass eine ausreichende Menge an Klebstoff eingebracht wurde.

Hierbei wurde speziell Klebstoff 2 mit verschiedenen Kohlenstofffaserkonzentrationen und unterschiedlichen Belastungsszenarien untersucht. Die drei Versuchsreihen mit den dazugehörigen Belastungssituationen sind in Abbildung 51 dargestellt.

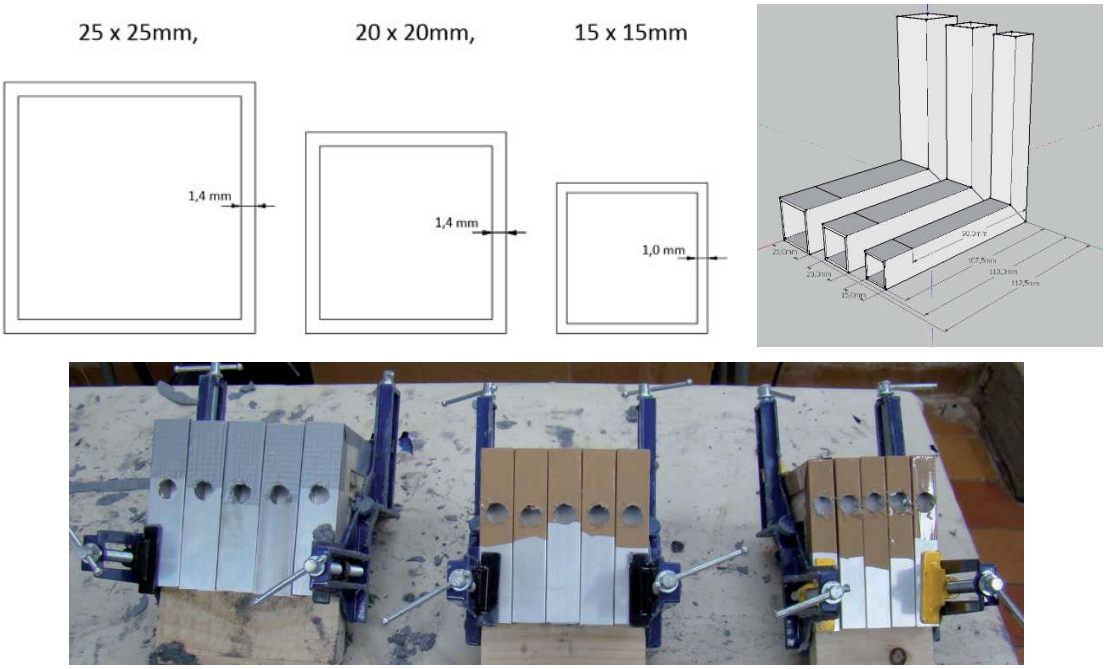


Abbildung 50: Abmessung der verwendeten Aluminiumecken

Die Belastungssituation 1, Abbildung 51, erzeugt ein öffnendes Moment in der Profilecke und somit die ungünstigste Einwirkung auf den Klebstoff. Die Belastungssituation 2 diente der Beurteilung der Adhäsionskräfte zwischen Aluminium und Klebstoff. In Belastungssituation 3 ergibt sich ein schließendes Moment in der Aluminiumecke. Es bildet sich ein komplexer Spannungszustand zwischen Aluminium und Klebstoff aus.

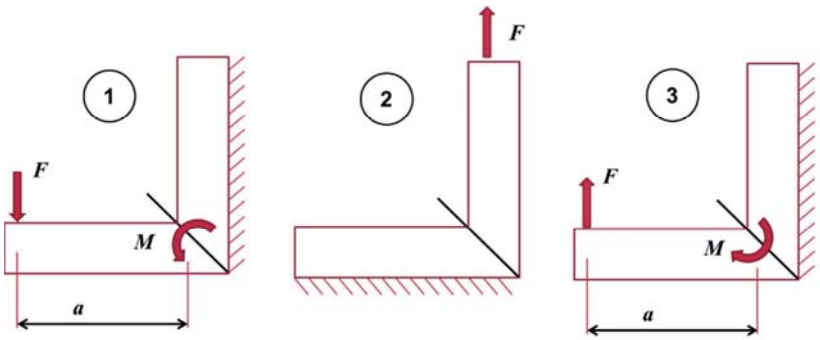
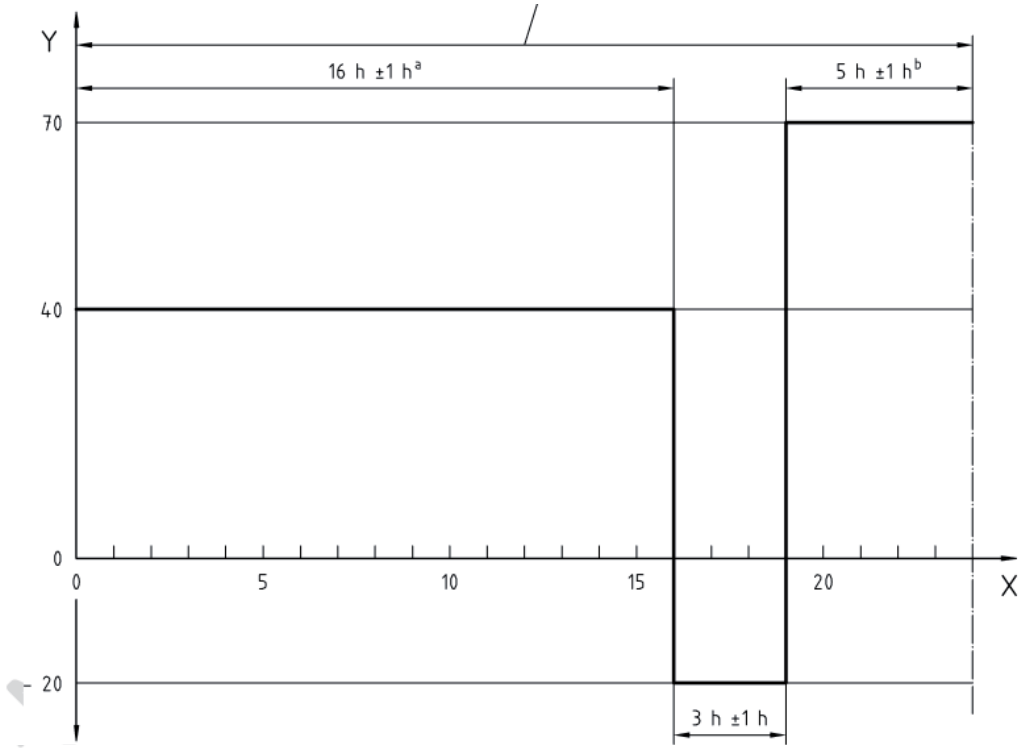


Abbildung 51: Drei Versuchsreihen der Aluminiumecken mit den dazugehörigen Belastungssituationen

Nach der Herstellung wurde ein Teil der Proben mit Hilfe einer Klimakammer über 1000 h einem Klimazyklus nach DIN EN ISO 9142 [DIN9142] ausgesetzt. Der gewählte Zyklus lief über jeweils 24 Stunden im Temperaturfeld zwischen -20 und 70°C und bei Luftfeuchtigkeit von 50 % – 99 %. Der genaue Ablauf des Klimazyklus ist in Abbildung 52 dargestellt.



Legende

X Einwirkdauer (h)
Y Temperatur (°C)
[a] mindestens 90 % r. F.
[b] (50 ± 5) % r. F.
[c] Zyklus n-mal wiederholt

Bild D.2 — Typische Bedingungen für den Zyklus D2 mit θ_A = 40 °C, θ_B = – 20 °C und θ_C = 70 °C

Abbildung 52: Klimazyklus nach DIN EN ISO 9142 [DIN9142]

Im Anschluss an die Klimalagerung wurden die Proben und die Referenzproben ohne klimatischen Einfluss unter den Belastungssituationen 1 und 2 getestet. Für alle untersuchten Belastungsszenarien wurden jeweils 5-10 Eckprofile geprüft und die Ergebnisse gemittelt.

5.7.3 Auswertung der Belastungstest

Bei der Gegenüberstellung der gemessenen Grenzlasten sowie der Steifigkeiten (Anstieg der (Kraft-Verformungs-Kurve) zeigte sich der deutliche Einfluss von Querschnittsfläche und verwendetem Faseranteil.

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse aus der Versuchsreihe 1 (Belastungssituation 1) gegenüber gestellt. Wie zu erwarten, ergeben sich aus größeren Profilquerschnitten auch größere Grenzlasten. Bei der anschließenden Untersuchung der Bruchflächen zeigte sich, dass bei den 20mm Profilen die Mischungen mit 2% und 3% Kohlenstofffaser eine unzureichende Klebstoffausbreitung im Bereich der belasteten Ecke aufwiesen. Des Weiteren ist speziell für die 15mm Profile keine signifikante Steigerung

der Festigkeit mit steigendem Fasergehalt erkennbar ist. Dies liegt in den geringen Abmessungen dieses Profils begründet.

Tabelle 10: Mittlere Druckkräfte aus Versuchsreihe 1 [kN]

	0 % Fasern		2 % Fasern		3 % Fasern	
	o.Klima	m.Klima	o.Klima	m.Klima	o.Klima	m.Klima
15 mm	0,17	0,18	0,23	0,21	0,22	0,15
20 mm	0,39	0,37	0,10	0,27	0,17	0,59
25 mm	0,59	0,80	0,90	1,08	0,44	1,26

Abbildung 53 zeigt exemplarisch den Verlauf der Belastungskurven aus Versuchsreihe 1. Der deutliche Einfluss der Kohlenstofffasermenge ist bei der Betrachtung der Endfestigkeit deutlich erkennbar.

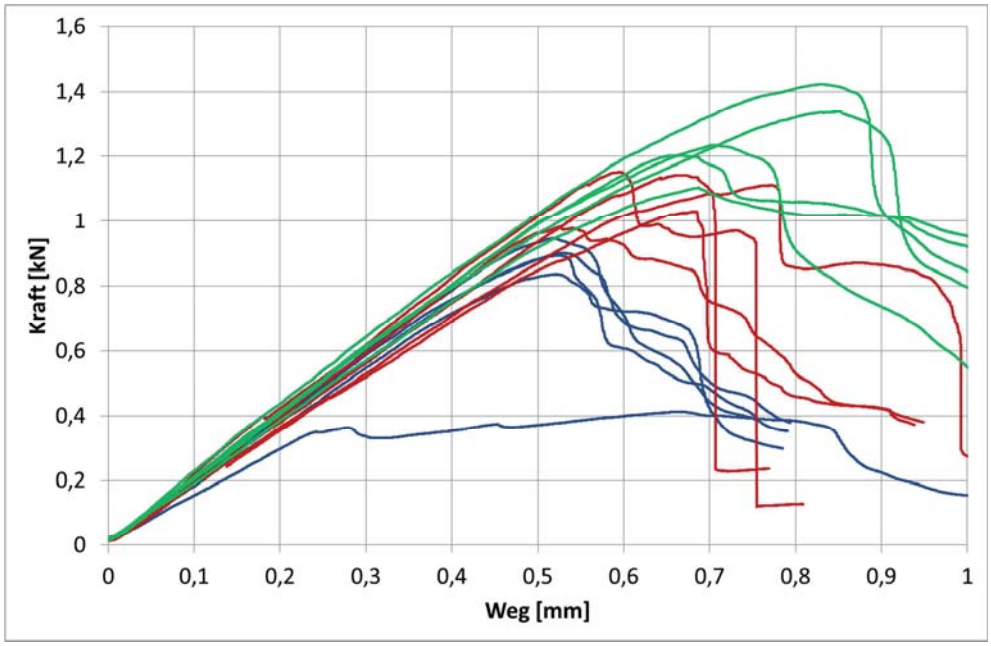


Abbildung 53: Auszug aus den Belastungskurven für Versuchsreihe 1 mit 25 mm Aluminiumquerschnitt nach Klimalagerung (blau 0%KF; rot 2%KF; grün 3%KF)

Im Vergleich zu einer Eckfixierung mit handelsüblichen Eckverbindern konnten speziell für die Versuchsreihe 1 leicht höhere Steifigkeiten erreicht werden. Jedoch liegen die Endfestigkeiten noch weit unter den Endfestigkeiten dieser Systeme.

Bei der Durchführung der 2. Versuchsreihe sollte die kohäsive Belastbarkeit der Aluminium-Klebstoff-Verbindung untersucht werden. Bei allen Proben war das adhäsive Versagen des Klebstoffes ausschlaggebend für das Zerreißen des Probekörpers. Lediglich bei 2 von 90 Proben konnte ein Herausziehen des Klebstoffes von mehr als

4 mm vor Eintreten des Bruches festgestellt werden. Tabelle 11 zeigt die maximalen Zugkräfte aus Versuchsreihe 2.

Die Zugfestigkeit der faserverstärkten Proben ist deutlich höher als bei den unverstärkten Proben. Lediglich bei den 20mm Profilen wurden durch fehlerhafte Klebproben stark schwankende Werte ermittelt.

Tabelle 11: Mittlere Zugkräfte aus Versuchsreihe 2 [kN]

	0 % Fasern		2 % Fasern		3 % Fasern	
	o.Klima	m.Klima	o.Klima	m.Klima	o.Klima	m.Klima
15 mm	1,82	1,84	1,81	2,54	1,79	2,50
20 mm	3,65	3,47	2,86	1,62	2,49	1,41
25 mm	3,89	3,60	6,08	8,19	5,26	7,21

In Tabelle 12 sind die Ergebnisse aus der Versuchsreihe 3 dargestellt. Auch hier ist deutlich der Einfluss aus Querschnitt und Kohlenstoffnfaseranteil erkennbar.

Tabelle 12: Mittlere Druckkräfte aus Versuchsreihe 3 [kN]

	0 % Fasern		2 % Fasern		3 % Fasern	
	o.Klima	m.Klima	o.Klima	m.Klima	o.Klima	m.Klima
15 mm	0,22	-	0,23	-	0,18	-
20 mm	0,62	-	0,11	-	0,31	-
25 mm	0,86	-	0,88	-	1,51	-

Die klimatisierten Proben wiesen eine geringfügig höhere Festigkeit gegenüber den Proben ohne Klimabelastung auf, was auf eine Nachhärtung der Proben schließen lässt. Es konnten keine negativen Einflüsse durch die Klimalagerung festgestellt werden.

In der Auswertung der Profilecken zeigten sich zum Teil große Streuungen in den erreichten Bruchlasten. Dies konnte bei der optischen Untersuchung der Bruchflächen auf zum Teil große Lufteinschlüsse und unzureichende Klebstoffausbreitung zurückgeführt werden. Abbildung 54 zeigt verschiedene Bruchflächen der belasteten Aluminiumecken. Bei den beiden linken Proben ist deutlich die unzureichende Klebstoffverteilung in der belasteten Ecke erkennbar. Auf der rechten Seite der Abbildung sieht man das typische Bruchbild für die Versuchsreihe 3.

Abbildung 54: verschiedene Bruchflächen der belasteten Aluminiumecken

5.7.4 Numerische Untersuchungen an den Aluminiumprofilen

Anhand der mechanischen Charakterisierung der Klebstoffe wurde im Rahmen der numerischen Simulation, Abbildung 55, ein analytisches Materialmodell erstellt, mit dem in speziellen Belastungssituationen Aussagen über die Versagenswahrscheinlichkeit und Verformungsverhalten getroffen werden konnte.

Die Ermittlung des Verformungszustands an den untersuchten Aluminiumeckverbindungen, sowie die Verformung der bei Schüco International KG untersuchten Proben konnten anhand der numerischen Simulation hinreichend genau abgebildet werden.

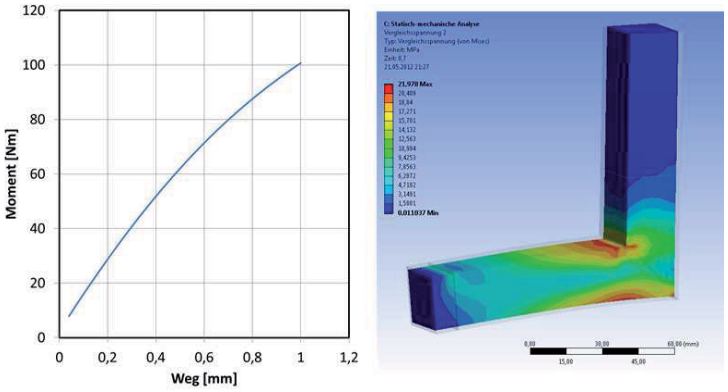


Abbildung 55: Simulierte Spannungen an belasteter Aluminiumecke

Die Analyse der Klebverbindung zeigte eine hohe Spannungskonzentration im inneren Bereich der Eckverbindung. Dies bestätigt ebenfalls die Bruchbilder der untersuchten Aluminiumecken.

Die Ergebnisse zeigten, dass mit Hilfe des 2K-faserverstärkten Klebstoff (3% Kohlenstofffasern) abhängig von der Belastungssituation ähnliche Steifigkeiten wie mit handelsüblichen Aluminiumeinsätzen erreicht werden konnten.

6 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Innerhalb des Forschungsprojektes „*Applikation und Einsatz von faserverstärkten Klebstoffen im Bauwesen - FibrAdh*“ sollten Grundlagen des rheologischen und mechanischen Verhaltens von zweikomponentigen faserverstärkten Klebstoffen (2K-fvK) erarbeitet werden. Die 2K-fvKs sollten mit Hilfe der erhaltenen Erkenntnisse gezielt optimiert werden können, um diese neue und innovative Werkstoffklasse anforderungsnah für den Anwendermarkt formulieren zu können. Für eine optimale Anwendung in der Industrie waren dafür Prozessparameter und die grundsätzliche Verarbeitbarkeit zu untersuchen. Dies sollte dazu dienen, eine effektive Verarbeitungsprozesskette zu entwickeln bzw. vorhandene Anlagentechnik auf ihre Eignung zu prüfen.

Zu Beginn des Projektes wurden die zu untersuchenden Klebstoffe festgelegt. Bezug nehmend auf vorrangegangene Forschungsprojekte fiel die Auswahl auf zwei aufeinander aufbauende 2K-Epoxidharz-Klebstoffsysteme. Epoxidharze stellen aufgrund ihres Eigenschaftsspektrums eine für den Baubereich interessante Klebstoffklasse dar. Darüber hinaus finden sie vielfach Verwendung im Bereich des strukturellen Klebens von Fahrzeugen (Automobil, Schienenfahrzeuge, Flugzeug) und im Bereich von Windenergieanlagen.

Der ausgewählte Klebstoff 2 ist eine bereits mit Quarzsandpartikeln weiterformulierte Modifikation von Klebstoff 1; diese Klebstoffe bauen chemisch aufeinander auf. Im Laufe des Projektes kam ein weiterer 2K-Epoxidharz-Klebstoff (Klebstoff 3) mit bereits eingemischten Glasfasern (< 2mm) hinzu. Dieser Klebstoff wird in Windenergieanlagen in der handelsüblichen Form bereits eingesetzt. Bei der Auswahl der Faserarten zur Modifikation der bestehenden Klebstoffsysteme wurde sich auf Kohlenstofffasern (CF), Glasfasern (GF) und Aramidfasern (AF) im Langfaserbereich ≥ 3mm geeinigt.

Zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit der unterschiedlichen Faser-Klebstoff Gemische wurden umfangreiche rheologische Untersuchungen durchgeführt. Hierbei wurden die einzelnen Klebstoffkomponenten mit unterschiedlichen Faserarten und Faserkonzentrationen untersucht. Es stellte sich heraus, dass je nach Faserart ab einem bestimmten Füllgrad die Viskosität eine Größe erreicht, in der eine akzeptable Homogenisierung nicht mehr möglich ist. Für Klebstoff 2 beispielsweise trat dieser Viskositätssprung bei CF-Gehalten > 3%, GF-Gehalten > 5 % und bei AF-Gehalten > 1,5 % ein.

Bei allen drei 2K-Klebstoffen ist die Viskosität der Komponente A (Harzkomponente) wesentlich niedriger als die Viskosität der Komponente B (Härterkomponente). Die Zumischung der Fasern ist in Komponente A am sinnvollsten, da dadurch der Unterschied in den Viskositäten der beiden Komponenten am geringsten ist. Ähnliche Viskositäten werden i.a. als günstiger für eine gute Homogenisierung angesehen.

Bei der anschließenden mechanischen Charakterisierung der einzelnen Faser-Klebstoff-Kombinationen zeigte sich ein Fasersättigungspunkt, bei dem ein maximaler E-Modul bzw. eine maximale Zugspannung gemessen wurde. Bei Klebstoff 2 kann in Verbindung mit Kohlenstofffasern ein maximales E-Modul bei einem Fasergehalt von 4% erreicht werden. Die Modifikation von Klebstoff 2 mit unterschiedlichen Anteilen

Glasfasern ergab keinen nennenswerten Einfluss auf die Zugfestigkeit. Der Einfluss der Aramidfasern auf die Festigkeit war ebenfalls gering.

Die Proben der Belastungstest wurden im Weiteren mikroskopisch und makroskopisch untersucht. Hierbei zeigten sich eine unzureichende Mischung und das fehlerhafte Aufbrechen der Glasfaserbündel sowie eine leichte Nestbildung der Aramidfasern. Die beste Einbindung der Fasern in die Klebstoffmatrix lieferten die Kohlenstofffasern.

Im Rahmen der mikroskopischen Untersuchungen wurden bei den gemischten Klebstoffen zahlreiche Fehlstellen in Form von Luftblasen und Fasernestbildung entdeckt. Dies unterstreicht die Notwendigkeit der Verwendung eines geeigneten Misch- und Fördersystems für die modifizierten Klebstoffe.

In Zusammenarbeit mit dem PA-Mitglied *Reinhardt Technik GmbH* wurden verschiedene Systeme getestet. Mit der Förderpumpe Visco Star 20 gelang es, verschiedene Fördergeschwindigkeiten mit Klebstoff 2 zu realisieren.

Bei Langzeitpumpversuchen wurde allerdings festgestellt, dass die Pumpe zahlreiche Verschleißerscheinungen aufwies. Für den längerfristigen Einsatz muss daher zukünftig die Oberflächenqualität des Förderraums den speziellen Anforderungen angepasst werden. Außerdem sollten eine Verkürzung der Wartungsintervalle sowie eine regelmäßige Nachjustierung für eine kontinuierliche Förderqualität sorgen.

Parallel zu den Pumpversuchen wurde auch die Möglichkeit der Verwendung von 2K-Klebstoffkartuschen mit Statikmischer untersucht. Dies blieb jedoch ohne Erfolg.

Der Klebstoff 3 wird bereits in der Anwendung für Windenergieanlagen über ein Pumpensystem gefördert. Für Klebstoff 2 muss hingegen zukünftig eine geeignete Fördermöglichkeit gefunden werden, da mit den evaluierten Systemen keine langzeitbeständige Förderung möglich war, ohne Pumpe und Klebstoff zu schädigen.

Als Alternative zur Förderpumpe besteht jedoch aufgrund der Untersuchungen für kleinere Anwendungsfälle die Option, die Homogenisierung des 2K-fvK mittels Vakuummischer durchzuführen und anschließend die Applikation über Eurokartuschen zu realisieren.

Für die Evaluierung neuer Anwendungsfelder wurden unter Verwendung von Klebstoff 2 in Kombination mit Kohlenstofffasern zahlreiche Aluminiumprofilecken beim PA-Mitglied *Schüco International KG* hergestellt und ihre Verfestigungseigenschaften mit eingeklebten Eckverstärkungsprofilen verglichen. Es konnten ähnliche Steifigkeiten erreicht werden bei einer jedoch geringeren Endfestigkeit als im versteiften Originalprofil. Die prinzipielle Machbarkeit der Anwendung war jedoch gegeben. Der praktische Nutzen des 2K-fvK besteht in einer deutlich einfacheren Handhabung.

Die neuen Forschungsergebnisse haben die Basis geschaffen, die Klasse der 2K-fvKs am Markt für zunächst im Fokus stehende Bereiche wie den Bausektor, aber auch weitere wichtige Einsatzgebiete wie Schienenfahrzeugbau oder den konstruktiver Stahlbau als mögliche Option des strukturellen Klebens und Versteifens anzubietlen. Für den Anlagenbau besteht aber zunächst noch weiterhin die Aufgabe, die benötigte Anlagentechnik für diese stark abrasiven Medien tauglich auszulegen, damit praktikable Anlagenkonzepte umgesetzt werden können. Für kleinere Anwendungen

konnte diese Problematik durch eine Verwendung von einzelgefüllten, manuell verarbeitbaren Eurokartuschen gelöst werden.

7 Wirtschaftliche Bedeutung der Ergebnisse

In den Fachgebieten Werkstoffe und Materialien, Fügetechnik und Automatisierungstechnik leisten die Ergebnisse einen wertvollen Beitrag, wodurch ein wirtschaftlicher Nutzen zu erwarten ist.

In den Wirtschaftszweigen Hochbau, Energieversorgung und Maschinenbau können die Ergebnisse sinnvoll verwertet werden.

8 Plan zum Ergebnistransfer und Umsetzung der Ergebnisse in die Wirtschaft

Tabelle 13: Bereits erfolgte Transfermaßnahmen

Maßnahme	**Ziel**	**Rahmen**	**Datum / Zeitraum**
1. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch, Abstimmung	Vorstellung / Diskussion der Ergebnisse, weitere Vorgehensweise	19.04.2011
2. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch, Abstimmung	Vorstellung / Diskussion der Ergebnisse, weitere Vorgehensweise	10.11.2011
3. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch, Abstimmung	Vorstellung / Diskussion der Ergebnisse, weitere Vorgehensweise	22.05.2012
4. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch, Abstimmung	Vorstellung / Diskussion der Ergebnisse, weitere Vorgehensweise	08.04.2013
5. Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses	Fortschrittsbericht, Erfahrungsaustausch, Abstimmung des Abschlussberichte	Vorstellung / Diskussion der Ergebnisse	27.06.2013
Vorstellung des Forschungsprojekts	Darstellung der Zielsetzung und der Kernpunkte vor möglichst breitem Publikum	Hannover-Messe für Industrie (HMI) 2013	08.-12.04.2013
Veröffentlichung der Forschungsergebnisse	Darstellung der Forschungsergebnisse vor möglichst breitem Publikum	Präsentation der Ergebnisse auf dem 13. Kolloquium: „Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik“ DECHEMA e.V., Frankfurt am Main	26.02.2013 – 27.02.2013

Tabelle 14: Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	**Ziel**	**Rahmen**	**Datum / Zeitraum**
Veröffentlichung der Forschungsergebnisse	Darstellung der Forschungsergebnisse vor möglichst breitem Publikum	Präsentation der Ergebnisse auf dem 14. Kolloquium: „Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik“ DECHEMA e.V., Frankfurt am Main	18.+19. 02 2014
Integration der Erkenntnisse in die Lehre	Ausbildung von Studenten nach aktuellem Stand der Forschung	Vorlesung „Fügetechniken für den Leichtbau“	Ab SS 2014
Integration der Erkenntnisse in Normen und Merkblätter	Aktualisierung von Normen und Merkblättern	Mitarbeit in Normungsgremien wie der AGV8.1, Dosieranlagen und Einarbeitung der Projektergebnisse in passende Merkblätter und Normenvorschläge	Ab 01/2014
Veröffentlichung der Forschungsergebnisse	Darstellung der Forschungsergebnisse vor möglichst breitem Publikum	Veröffentlichung der Ergebnisse in Fachzeitschriften wie „Adhäsion – Kleben & Dichten“ und „International Journal of Adhesion and Adhesives“	1. + 2. Quartal 2014
Vorstellung des Forschungsprojekts	Darstellung der Zielsetzung und der Kernpunkte vor möglichst breitem Publikum	Präsentation im Rahmen der Hannover-Messe für Industrie (HMI) 2014	07.-11.04.2014
Veröffentlichung der Forschungsergebnisse	Darstellung der Forschungsergebnisse vor möglichst breitem Publikum	Veröffentlichung des Abschlussberichtes auf der Homepage der Institute	4. Quartal 2013

9 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Verzögerung durch Personalengpässe am ifs im Haushaltsjahr 2011 konnten im Jahr 2012 teilweise aufgeholt werden. Prüfapparaturen konnten aufgrund von Belegungen erst mit Verspätung für dieses Projekt genutzt werden. Dies gilt im Besonderen für die Bereitstellung von Versuchsanlagen und Geräten seitens der Industriepartner. Diese Verzögerungen haben dazu geführt, dass die Forschungsstellen eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes um fünf Monate beantragt hatten. Diesem Antrag wurde stattgegeben. Im Laufe der Verlängerung konnte das Projekt zu einem zufrieden stellenden Abschluss gebracht werden.

10 Literaturverzeichnis

[Alv2004] Alvarez, V.A., Terenzi, A. Kenny, J.M. und A. Vazquez: Melt rheological behaviour of starch-based matrix composites reinforced with short sisal fibers; Polymer Engineering and Science, Vol. 44, Oktober 2004, Nr. 10, S. 1907 – 1914

[Ber2009] Berstorff; Zweischneckenextruder ZE-Baureihe PVC-Granuliersysteme; Firmenschrift; 2009; http://www.berstorff.de/servlet/com.othiemann.wtk.servlets.BinaryLoader/wtk_form_id/WWW_MODULE_IMAGE/wtk_action/loadbinary/wtk_ttl/1w/wtk_variant/original_image/wtk_section/original/wtk_doc_id/72768/rnd/0.05038098577201078

[Bit2002] Bittmann E.; Viel Wind um GFK – Werkstoffe und Verfahren im Rotorblattbau. Carl Hanser Verlag, Kunststoffe 92 (2002) 11, S. 119 - 124

[Bra1980] Braun, D.; Volz, P.: Verschleiß von Maschinen und Werkzeugen beim Verarbeiten von verstärkten und gefüllten Kunststoffen, Z. Werkstofftech. 11, S. 440 – 446 (1980)

[Bür2003] Bürkle, E.; Sieverding, M., Mitzler, J.: Spritzgießverarbeitung von langfaserverstärktem PP. Kunststoffe 2/2003, Seite 47 – 50

[BUW2008] Abschlussbericht zum AiF/PROINNO Kooperationsprojekt “Neuartige Klebtechniken für Elemente im Fassadenbau”, Bauhausuniversität Weimar, RSB Rudolstädter Systembau GmbH, innovative Klebtechnik Zimmermann iKTZ, Juli 2008.

[Cha1978] Chan, Y. A.: Fundamental study of rheological properties of glass fiber reinforced polyethylene and polystyrene melts; Journal of Rheology 1978; S. 507-524

[Cro1980] Crowson, R.J., Folkes, M.J. und P.F.Bright: Rheology of glass fibre-reinforced thermoplastics and its application to injection molding. Polymer Engineering an Science 20 (1980); S. 925-933

[End1990] Endlich, W.; Kleb- und Dichtstoffe in der modernen Industrie, Vulkan-Verlag Essen; 1990

[Göb2009] Göbel, M.; Werner, F.: Faserverstärkte Klebstoffe – Betrachtung der Verbundtragwirkung. DGM-Tagung „Verbundwerkstoffe“, 2009

[Hau2013] Hauschild & Co KG; http://www.speedmixer.de, 2013

[Hen1989] Hensen, F., Knappe, W. und H. Potente; Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik; Bd. 1; Grundlagen; Carl Hanser Verlag; ISBN 3-446-14339-4; 1989

[Her2008] Herbst Firmenhandbuch „Mischtechnik“; Mai/2008; http://www.herbst-mischtechnik.de/home1_herbst_mischtechnik_ ruehrwerke.htm

[Hil2009] Hilger und Kern; Mischsysteme; Firmenschrift; 2009; http://www.hilger-kern.com/index.cfm?rub=8

[Joh2001] Johannaber, F. und W. Michaeli; Handbuch Spritzgießen; Carl Hanser Verlag; ISBN 3-446-15632-1; 1. Auflage 2001

[Mez2010] Mezger, T.; Das Rheologie Handbuch, 3. Auflage, Vincentz Network Hannover, 2010

[Sch1997] Schmid, B.: Spritzgießen von langfaserverstärktem Polyamid PA 6.6 unter besonderer Berücksichtigung der Faserlängenreduktion während des Formgebungsprozesses; VDI-Verlag; 1997; VDI-Reihe 2 Nr. 410; ISBN 3-18-341002-8

[Sta2008] Stadler, M.; Punkt- und Raupendosierung im beliebigen Wechsel; Fachzeitschrift Adhäsion 03/2008; Seite 20-23

[Sul2008] Sulzer Chemtech; Mischer für die Kunststoffverarbeitung; Firmenschrift; 2008; http://www.kunststoff-schweiz.ch/fakuma/html/sulzer_chemtech_fakuma_08.html

[Zlo1999] Zlokarnik, M.; Rührtechnik – Theorie und Praxis; ISBN 3-540-64639-6; Springer Verlag 1999

[DIN527-4] Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe (ISO 527-4:1997)

[DIN1465] Klebstoffe – Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen (EN 1465:2009)

[DIN9142] Klebstoffe – Auswahlrichtlinien für Labor-Alterungsbedingungen zur Prüfung von Klebverbindungen (ISO 9142:2003)

11 Durchführende Forschungsstellen

1. TU Braunschweig - Institut für Füge- und Schweißtechnik
Langer Kamp 8, D-38106 Braunschweig
Tel.: 0531/391-7820, Fax.: 0531/391-5834

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger
Projektleiter: Dr. rer. nat. Fabian Fischer
Sachbearbeiter: Dr.-Ing. Mark Hellmanns

2. Bauhaus-Universität Weimar
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau - Professur Stahlbau
Marienstraße 7A, D-99423 Weimar
Tel. 03643/58-4444, Fax: 03643/58-4541

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Werner
Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Werner
Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. Björn Wittor

12 Danksagung

Das IGF-Vorhaben 16.956 B „Applikation und Einsatz von faserverstärkten Klebstoffen im Bauwesen (FibrAdh)“ der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren des DVS e.V., Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die Arbeitsgemeinschaft Industrielle Forschung (AiF e.V.) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die durchführenden Forschungsstellen bedanken sich ausdrücklich bei den vorgenannten Institutionen für die hervorragende Betreuung und Förderung des Projektes.

Besonderer Dank gilt den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die vielen konstruktiven Diskussionen während der Sitzungen sowie die Bereitstellung vieler im Projekt verwendeter Materialien und Technikumskapazitäten.

<u>Mitglieder im Arbeitskreis (alphabetische Reihenfolge):</u>

Hilger u. Kern GmbH

iKTZ - Innovative Klebtechnik Zimmermann

Reinhardt Technik GmbH

RSB – Rudolstädter Systembau GmbH

Schüco International KG

Sika Technology AG