

Kapitel 1

Einleitung und Motivation

Die vorliegende Arbeit untersucht die lokale mechanische Beanspruchbarkeit organischer Schaltungsträgersubstrate und entwickelt eine numerische Modellierungsmethodik zur Berücksichtigung dieser im simulationsgestützten Entwicklungsprozess elektronischer Steuergeräte für Automotive-Anwendungen. In diesem Kapitel werden die Motivation sowie die industrielle und wissenschaftliche Relevanz der Arbeit vorgestellt. Dem folgt die Erläuterung und Diskussion der Struktur der Thesis und der in ihr zu lösenden Arbeitspakete.

1.1 Trends der elektronischen Aufbau- und Verbindungstechnik für Automotive-Anwendungen

Die aktuellen automobilen Megatrends der Elektrifizierung des Antriebsstranges sowie das autonome Fahren stellen neue Herausforderungen an die in Fahrzeugen befindliche elektronische Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT).

So führt die Elektrifizierung des Antriebsstranges zu hohen elektrischen Leistungen im Kraftfahrzeug, die durch geeignete elektronische Systeme bedarfsgerecht gesteuert werden müssen. Insbesondere in der Leistungselektronik verlangen Schaltungsträger nach einem isolierenden Basismaterial mit einem geeigneten thermischen Ausdehnungskoeffizienten (engl.: coefficient of thermal expansion - CTE) sowie einer hohen thermischen Leitfähig- und Beständigkeit [Tro14]. Vor diesem Hintergrund haben sich Keramiken aufgrund ihrer thermischen Leitfähigkeit und Temperaturstabilität bei gleichzeitiger niedriger thermischer Ausdehnung als Substrate und Träger thermisch belasteter Bauteile etabliert ([Pec91], [Wel17]). Das zur Herstellung keramischer Schaltungsträger überwiegend verwendete Verfahren des direct bonded copper (DBC) (auch: direct copper bonded - DCB) ist gegenüber Schaltungsträgern auf organischer Basis kostenintensiv und für eine einfache Skalierbarkeit nur eingeschränkt geeignet [Pec91]. Die Produktion gedruckter Schaltungen auf organischen Basismaterialien kann hingegen insbesondere für hohe Stückzah-

len kostengünstig realisiert werden. Verschiedene Leiterplattenhersteller vermarkten darüber hinaus bereits Technologien, um höhere Leistungsklassen bedienen (z. B. [SE20], [WE20], [KSG20]) und damit eine kostengünstige Alternative zu keramischen Schaltungsträgern bieten zu können. Hierzu werden überwiegend größere Kupferquerschnitte in und auf den Schaltungsträgersubstraten realisiert. Jene Basismaterialien verfügen jedoch oft nicht über die notwendige thermische Beständigkeit, um eine vollwertige, kostengünstige und zuverlässige Alternative zu keramischen Substraten bieten zu können. Vor diesem Hintergrund ist in den vergangenen Jahren die Entwicklung neuer Basismaterialien für Hochtemperaturanwendungen im Automotive-Bereich in den Fokus gerückt. In dem durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) öffentlich geförderten Projekt HELP² bzw. im Rahmen des Projekts smart-PVI-Box wurden bspw. Basismaterialien mit erhöhter Glasübergangstemperatur und thermischer Leitfähigkeit entwickelt und eingesetzt ([BMBF14], [BMBF19]). Das Ergebnis jener Materialentwicklungen ist eine Mehrzahl an organischen Basismaterialien mit erhöhter Glasübergangs- und damit höherer möglicher Einsatztemperatur. Das mechanische Verhalten und die damit verbundene Beständigkeit dieser Materialien im Anwendungsfall ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch weitgehend unbekannt.

Im Zuge des autonomen Fahrens und des damit einhergehenden Anstieges der Systemkomplexität gewinnen darüber hinaus zentrale elektronische Steuergeräte im Kraftfahrzeug gegenüber heute verwendeter, dezentraler Einzelkomponenten an Bedeutung [Loc20]. Diese sogenannten Domänensteuergeräte ermöglichen die Erfassung und Verarbeitung diverser Sensorsignale und errechnen daraus ein präzises Modell des Fahrzeugumfeldes [Bos20]. Die hierzu erforderliche Rechenleistung kann durch Hochleistungsprozessoren in der Bauform des Ball Grid Arrays mit hoher Packungsdichte (engl.: high density ball grid arrays – HD-BGA) bereitgestellt werden ([Ger13], [Ser19]). Je nach Auslegung der Recheneinheit können dabei mehrere hundert Kontaktierungspunkte in Form von Lotkugeln (engl.: solder balls) an einem (HD-)BGA entstehen [Ger13]. Insbesondere für BGA-Bauteile mit hoher Rechenleistung und den daraus folgenden großen geometrischen Abmessungen ist aufgrund der Bauteileinzelkosten eine mehrfache Redundanz des Systems aus wirtschaftlicher Sicht zu hinterfragen. Die Optimierung der Zuverlässigkeit der Einzel- und Systemkomponenten nimmt somit eine zentrale Rolle im Entwicklungsprozess jener zentralen Steuergeräte ein.

1.2 Lokale Beanspruchbarkeit organischer Basismaterialien

Als Basismaterialien organischer Schaltungsträger haben sich Glasfaserverbundwerkstoffe durchgesetzt. Das zur mechanischen Verstärkung in die Polymermatrix eingebrachte Glasfasergewebe führt zu einem anisotropen Materialverhalten. Je nach Belastungsrichtung bzw. -winkel

² Zuverlässige und kostengünstige **Hochtemperatur-Elektronik** für die Elektromobilität auf Basis von **Leiterplatten** aus hochtemperaturbeständigen Harzsystemen (HELP) im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme der **Schlüsseltechnologien** für die **Elektromobilität** (STROM) [BMBF14]

ändern sich somit die thermomechanischen Materialeigenschaften wie der Elastizitätsmodul oder der thermische Ausdehnungskoeffizient. Die sinusförmig verlaufenden Glasfasergewebebündel des Gewebes führen darüber hinaus zu unterschiedlich großen Bereichen der Polymermatrix und damit zu ortsabhängigen bzw. lokalen Materialeigenschaften. Aufgrund ihrer gegenüber dem Glasfasergewebe deutlich geringeren Steifigkeit bestimmt die Polymermatrix die mechanische Beanspruchbarkeit eines organischen Schaltungsträgersubstrates. Die Konsequenz einer unzureichenden thermomechanischen Beständigkeit dieser Polymermatrix äußert sich durch ein mechanisches Versagen in Form einer Rissinitiierung mit anschließendem Rissfortschritt. Jene Rissbildung im Basismaterial kann zu Rissinitiierungen bzw. -wachstum in Kupferleiterbahnen führen und somit eine Unterbrechung des elektrischen Kontakts verursachen. In Kombination mit elektrochemischer Migration können Risse der Polymermatrix darüber hinaus Leiterzüge unterschiedlichen Potentials miteinander verbinden und Kurzschlüsse verursachen. Dieses mechanische Materialversagen kann folglich bis zum vollständigen Ausfall der gesamten Baugruppe führen.

Die Wahrscheinlichkeit eines solchen mechanischen Materialversagens hängt neben den lokalen Materialeigenschaften stark von der dort wirkenden thermomechanischen Belastung ab. Aus den oberhalb beschriebenen Megatrends (vgl. Abschnitt 1.1) resultieren fortlaufend höhere Belastungen des Schaltungsträgersubstrats. Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Verfahren zur Realisierung hoher elektrischer Leistungen auf organischen Schaltungsträgern lassen in Folge steigender Temperaturen auch die thermomechanischen Belastungen des Basismaterials steigen. Darüber hinaus werden den Polymermatrizen in diesen Basismaterialien häufig anorganische Füllstoffe hinzugefügt, die eine Beeinflussung des CTE und höhere Glasübergangstemperaturen ermöglichen, jedoch eine Steifigkeitserhöhung des Materials mit sich bringen ([Eye05], [Tro14], [BMBF19]). Der Abbau von mechanischen Spannungen durch Umlagerungs- bzw. Verformungsprozesse im Material, die durch äußere Deformation hervorgerufen werden, wird in jenen Materialien folglich erschwert, wodurch ein mechanisches Versagen wiederum wahrscheinlicher wird.

Die für das autonome Fahren notwendige Rechenleistung und die damit verbundene Miniaturisierung der Bauelemente erhöhen darüber hinaus die lokale Belastung des Basismaterials. Bei großen Kontaktpads verteilen sich thermomechanische Belastungen gleichmäßig auf dem Basismaterial, wodurch die lokalen Materialeigenschaften eine untergeordnete Rolle spielen. Bei BGA-Bauelementen mit geringen Abmessungen der elektrischen Kontaktierungen in Form von Lotkugeln können die lokalen Materialeigenschaften des Schaltungsträgersubstrats die Zuverlässigkeit der gesamten Baugruppe hingegen signifikant beeinflussen.

Die Polymermatrix glasfaserverstärkter, organischer Schaltungsträgersubstrate stellt folglich bzgl. der mechanischen Beanspruchbarkeit dieser Materialien eine Schwachstelle dar. Infolge lokaler mechanischer Überbelastungen können Risse im Material initiiert werden, deren Fortschritt die Gesamtzuverlässigkeit der elektronischen Baugruppe beeinflusst. Die im Kraftfahrzeug

auftretenden thermomechanischen Belastungen führen in Kombination mit den hohen Zuverlässigkeitsanforderungen an elektronische Steuergeräte im Automotive-Bereich über die gesamte Produktlebensdauer hinweg zur Notwendigkeit der Bewertung solcher Fehlerbilder. Die Möglichkeit der Berücksichtigung der lokalen thermomechanischen Materialeigenschaften des Schaltungsträgersubstrates bereits im simulationsgestützten Entwicklungsprozess elektronischer Steuergeräte kann die Wahrscheinlichkeit eines lokalen mechanischen Versagens des Schaltungsträgersubstrats im Einsatz folglich reduzieren. Die zum gegenwärtigen Zeitpunkt verfügbaren Modellierungsansätze für organische Schaltungsträgersubstrate ermöglichen die Berücksichtigung dieser lokalen Materialeigenschaften aufgrund des ihnen zugrundeliegenden Abstraktionsgrades jedoch nicht. Darüber hinaus bleiben Veränderungen jener lokalen Materialeigenschaften über die Produktlebensdauer vollständig unberücksichtigt. Die Nutzung dieser gegenwärtig verfügbaren Ansätze kann folglich zu Fehleinschätzungen der Materialperformance und damit zu Unter- bzw. Überdimensionierungen des Gesamtsystems führen, wodurch die Motivation zur Entwicklung eines genaueren Modellierungsansatzes resultiert.

1.3 Aufgabenstellung und Gliederung der Thesis

In der vorliegenden Arbeit soll eine Methodik zur Modellierung der lokalen Beanspruchbarkeit von organischen Schaltungsträgersubstraten über die Produktlebensdauer entwickelt werden. Hierzu soll ein ausgewähltes epoxidharzbasiertes Basismaterial anhand von zwei repräsentativen Volumenelementen (engl.: representative volume element - RVE) untersucht werden (vgl. Abbildung 1-1). Das RVE1 beschreibt dabei die mit anorganischen Füllstoffen gefüllte Polymermatrix des Basismaterials und das RVE2 den Glasfaserverbundwerkstoff.

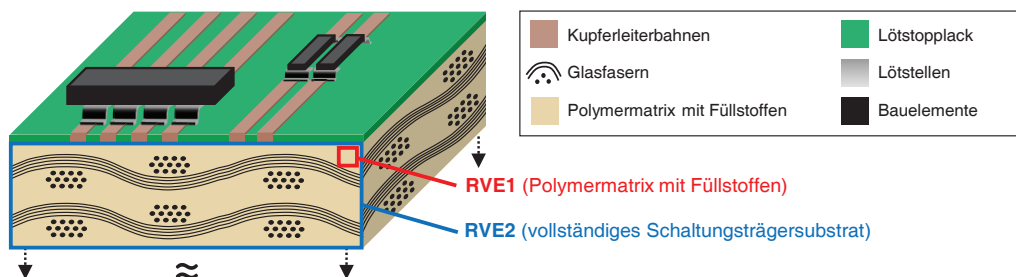


Abbildung 1-1: Definition von RVE organischer Schaltungsträgersubstrate zur Entwicklung einer Modellierungsmethodik zur Abbildung der lokalen Materialbeanspruchbarkeit

Aus der oberhalb erläuterten Aufgabenstellung der Entwicklung einer Modellierungsmethodik zur Berücksichtigung der lokalen Materialbeanspruchbarkeit des Schaltungsträgersubstrats über die Produktlebensdauer im Entwicklungsprozess elektronischer Steuergeräte resultieren die in Abbildung 1-2 in Form eines Flussdiagramms definierten Arbeitspakete.

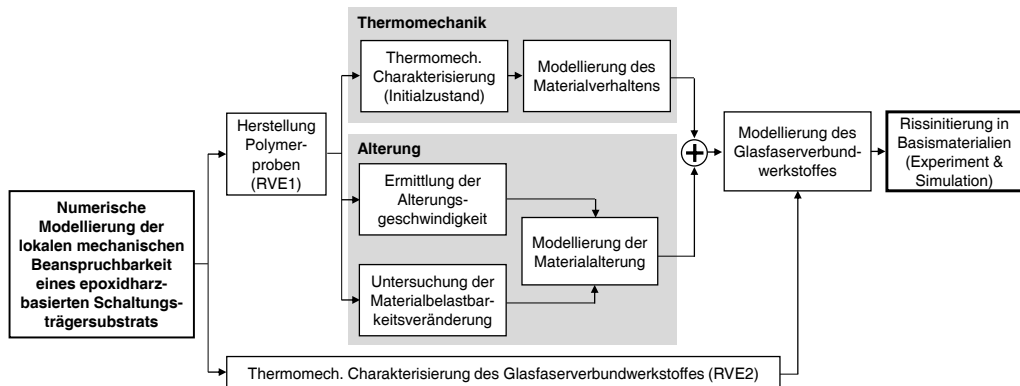


Abbildung 1-2: Flussdiagramm der definierten Arbeitspakete zur numerischen Modellierung der lokalen mechanischen Beanspruchbarkeit eines epoxidharzbasierten Schaltungsträgersubstrats bis zur Rissinitiation

Diese lassen sich in die experimentelle Materialanalyse und die Abbildung des ermittelten Materialverhaltens durch geeignete Methoden der Finiten-Elemente-Simulationen (FE-Simulation) sowie die Validierung der entwickelten Modellierungsmethodik unterteilen. Die Einzelblöcke bilden gleichzeitig die Haupt- bzw. Unterkapitel der vorliegenden Arbeit und sollen nachfolgend erläutert werden.

Für die experimentelle Materialanalyse sind zunächst geeignete Prüfkörper zu generieren, die die mechanischen Eigenschaften der Polymermatrix jener Basismaterialien vollständig abbilden. Die Untersuchung der Materialzusammensetzung sowie die des thermomechanischen Materialverhaltens ermöglichen im Folgenden Aussagen über die für ein mechanisches Versagen relevanten Materialeigenschaften. Es ist darüber hinaus davon auszugehen, dass sich diese im Initialzustand ermittelten Materialeigenschaften über die Produktlebensdauer aufgrund einsetzender Alterungseffekte signifikant ändern. Die Analyse der Materialalterung unter produktrelevanten Umgebungsbedingungen ist folglich ebenfalls wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit.

Die experimentell ermittelten Datensätze bilden den Ausgangspunkt zur Abbildung des Materialverhaltens durch Simulationsmodelle. Dabei muss ein Modellierungsansatz entwickelt werden, der neben der Abbildung der thermomechanischen Materialeigenschaften die aus dem Glasfasergewebe resultierende Lokalität des Materialverhaltens berücksichtigt. Hinzu kommt die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Materialalterung über die Produktlebensdauer.

Der entwickelte Ansatz zur Modellierung der lokalen Belastbarkeit organischer Schaltungsträgersubstrate wird durch den Vergleich von experimentell und simulativ ermittelten Datensätzen eines produktrelevanten Fehlerbildes unter feldrelevanten Randbedingungen hinsichtlich seiner Eignung geprüft.

Die in dieser Arbeit angestrebte Modellierungsmethodik für organische Schaltungsträgersubstrate soll folglich im Vergleich zu den gegenwärtig verfügbaren Ansätzen die Berücksichtigung der lokalen mechanischen Belastbarkeit bereits im Entwicklungsprozess und über die Produktlebensdauer elektronischer Steuergeräte ermöglichen. Dabei müssen sowohl Erkenntnisse über das Materialverhalten im Initialzustand als auch über dessen Veränderung durch Umgebungseinflüsse gewonnen werden. Die Identifizierung der Limitierungen heutiger und die Anforderungen an neue Modellierungsmethoden zur Abbildung des ermittelten Materialverhaltens sind dabei ebenfalls wesentliche Bestandteile der vorliegenden Arbeit. Elektronische leiterplattenbasierte Produkte, die in Folge der aktuellen automobilen Megatrends der Elektromobilität und des autonomen Fahrens über die gesamte Produktlebensdauer hohen Zuverlässigkeitsanforderungen unterliegen, können so bspw. durch die geeignete Platzierung von Bauelementen oder einer für die Anwendung geeigneten Materialauswahl zielgerecht dimensioniert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse über das Materialverhalten und dessen Abbildung können folglich für Forschungs- und Entwicklungsbereiche mit dem Fokus auf der leiterplattenbasierten Aufbau- und Verbindungstechnik in Industrie und Wissenschaft gleichermaßen relevant sein.

Kapitel 2

Grundlagen, Analyseverfahren und numerische Modellierung organischer Schaltungsträger

Das vorliegende Grundlagenkapitel dient der Einführung in die Technologie organischer Schaltungsträger in Form der derzeit verwendeten Materialien und Fertigungsprozesse der elektronischen AVT. Im Fokus steht dabei das Schaltungsträgersubstrat, das im Automotive-Einsatz hohen Anforderungen genügen muss. Überschreitungen der maximalen mechanischen Beanspruchbarkeit in Bezug auf die Belastungshöhe und -zeit führen zu verschiedenen Fehlerbildern des Basismaterials, die im Folgenden diskutiert werden. Es folgt die Vorstellung der Messverfahren, die zur Analyse und zur thermomechanischen Charakterisierung jener Substrate verwendet werden. Die numerische Berechnung der maximalen Materialbeanspruchbarkeit zur Vermeidung eines mechanischen Versagens sowie die Abbildung des beobachteten thermomechanischen Materialverhaltens setzt darüber hinaus die Kenntnis verschiedener Ansätze zur Materialmodellierung von Polymeren voraus. Im Hinblick auf die Abbildung der notwendigen, thermomechanischen Materialeigenschaften eines Basismaterials erfolgt abschließend die Bewertung heutiger Modellierungsansätze für organische Schaltungsträgersubstrate.

2.1 Einführung in die Technologie organischer Schaltungsträger

Gedruckte, organische Schaltungsträger (engl.: printed circuit boards - PCB) sind ein essentieller Bestandteil der heutigen elektronischen AVT. In verschiedenen Ausführungen (z. B. starr, flexibel, starr-flexibel, spritzgegossen) sind sie in nahezu jedem elektronischen Gerät implementiert. Die Kontaktierung der einzelnen elektronischen Bauelemente untereinander erfolgt über vorgefertigte elektrische Verbindungen. Die hohe Reproduzierbarkeit ermöglicht dabei eine wirtschaftliche Massenfertigung dieser Schaltungsträger. Starre Leiterplatten bestehen aus einer oder mehreren Lagen eines isolierenden Basismaterials mit je einer oder zwei, dem Schaltbild entsprechenden, strukturierten Kupferkaschierungen. Die Kontaktierung der einzelnen Kupferlagen durch das iso-

lierende Basismaterial bzw. Schaltungsträgersubstrat erfolgt über leitfähige Durchkontaktierungen (engl.: vias). Das Schaltungsträgersubstrat setzt sich wiederum aus einem Trägermaterial und einem Bindemittel zusammen. Neben der elektronischen Isolierung dienen jene Substrate der Fixierung der auf dem Schaltungsträger befindlichen elektronischen Bauelemente und zunehmend auch der Abführung von Wärme. [Ris12]

2.1.1 Basismaterialien organischer Schaltungsträger und deren Eigenschaften

Das gebräuchlichste Basismaterial gehört nach der Klassifikation des US-amerikanischen Verbandes der Elektronikhersteller (National Electrical Manufacturers Association – NEMA) zur Klasse 4 der schwer entflammaren und flammenhemmenden (engl.: flame retardant – FR) Verbundwerkstoffe, wodurch die Materialbezeichnung FR4 folgt. FR4-Basismaterialien verwenden Glasfasergewebematten als Trägermaterial und Epoxidharz als Bindemittel. ([Ris12], [Zic18])

Die meist in Schaltungsträgersubstraten verwendeten Epoxidharzsysteme gehen aus der Reaktion von Epichlorhydrin und Bisphenol A (vgl. Abbildung 2-1) hervor ([Eye05], [Kai16]). Die entstehenden kettenförmigen Epoxidharze werden auch als Präpolymer (Reaktionsharze) bezeichnet und sind im unvernetzten Zustand zähflüssig ([Eye05], [Kai16]). Die Reaktion mit Härtungsmitteln unter einer Additionspolymerisation führt durch die Bildung engmaschiger Vernetzungen zu einem duroplastischen Werkstoff [Kai16]. Zur Erhöhung der thermischen Stabilität des Basismaterials in Form der Zersetzungstemperatur T_d werden zum gegenwärtigen Zeitpunkt vorwiegend phenolische Härter eingesetzt [Lu08]. Da Epoxidharze im Ausgangszustand leicht entflammbar sind, erfolgt darüber hinaus die Zugabe von Flammschutzmitteln [Lu08]. Lange wurde zur Erreichung des FR4-Standards Tetrabrombisphenol-A (TBBPA) eingesetzt [Lu08]. Wie TBBPA gelten auch derzeit eingesetzte bromierte Flammschutzmittel als umweltschädlich, sodass der Trend hin zu halogenfreien Mitteln wie Verbindungen auf Phosphorbasis geht [Lu08].

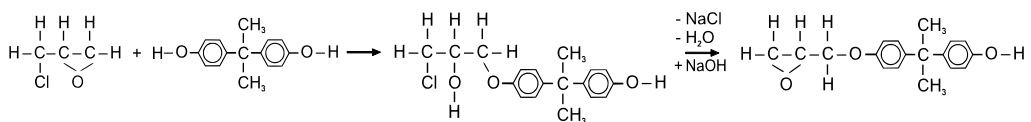


Abbildung 2-1: Reaktion von Epichlorhydrin und Bisphenol A zur Bildung eines neuen Epoxidringes nach [Kai16]

Epoxidharze weisen im ungefüllten Zustand einen CTE von über 80 ppm K⁻¹ auf [Mor08]. Damit dehnt sich ein epoxidharzbasiertes Basismaterial bei Temperaturerhöhung etwa fünf Mal so stark aus wie das Kupfer der Leiterbahnen, Kontaktpads und Durchkontaktierungen. Die Konsequenz ist ein schnelleres Versagen aufgrund unterschiedlicher CTE (engl.: CTE-mismatch). Aus vorgenanntem Grund erfolgt eine Reduzierung des CTE der Polymermatrix durch die Hinzugabe anorganischer Füllstoffe, die auch flammenhemmend wirken können ([Lu08], [Sta04]). Darüber hinaus lassen sich in Abhängigkeit der Art und Menge der Füllstoffpartikel auch die Glasübergangstemperatur und die Werkstoffsteifigkeit beeinflussen ([Eye05], [Tro14], [BMBF19]).

Basismaterialien des FR4-Standards sind Glasfaserverbundwerkstoffe. Das eingebrachte Glasfasergewebe dient der mechanischen Stabilisierung der epoxidharzbasierten Polymermatrix und reduziert gleichzeitig den horizontalen (in-plane) CTE [Sta04]. Abbildung 2-2 zeigt drei im Leiterplattenprozess standardisierte Gewebetypen. Die zugehörigen Bezeichnungen folgen aus dem Verhältnis der Bündelstärke bzw. der Anzahl der Glasfasern in Kett- bzw. Schuss-Richtung.

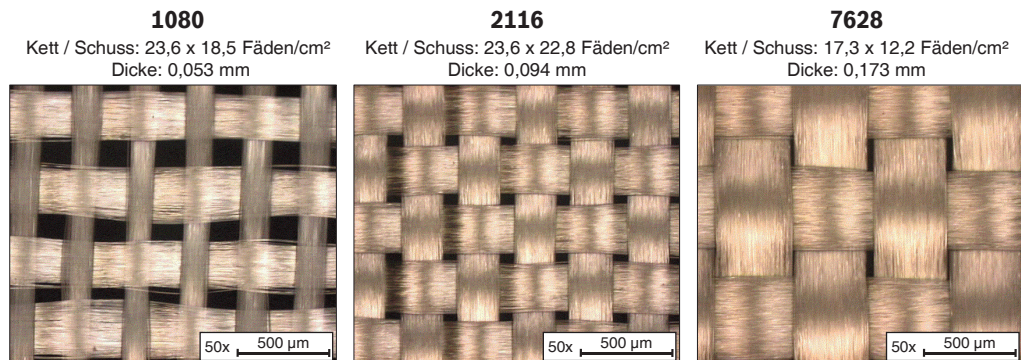


Abbildung 2-2: Draufsicht der standardisierten Glasfasergewebetypen 1080, 2116 und 7628 für organische Schaltungsträgersubstrate ohne Polymermatrix der Firma Isola ([Iso20], [Lu08])

Für organische Schaltungsträgersubstrate können verschiedene Typen von Glasfasern verwendet werden, die sich in ihrer Zusammensetzung unterscheiden. Für elektronische Anwendungen wird häufig das unter dem Namen E-Glas bekannte Borosilikatglas verwendet. Es besteht überwiegend aus Siliziumoxid, Kalziumoxid, Aluminium, Boroxid und alkalischen Oxiden. [Lu08]

Deformations-, Zeit- und Temperaturverhalten

Die mechanischen Eigenschaften und damit das Deformationsverhalten von Glasfaserverbundwerkstoffen wie dem Leiterplattenbasismaterial werden vom Glasfasergewebe dominiert [Tes19]. Aufgrund der unterschiedlichen Stärken der Glasfaserbündel (eng.: rovings) in Kett- und Schuss-Richtung folgt für die mechanischen Eigenschaften des Glasfaserverbundwerkstoffes eine ausgeprägte Richtungsabhängigkeit. Glasfasern verhalten sich dabei näherungsweise linear elastisch [Sch07], sodass aus dem eingebrachten Glasfasergewebe keine Nichtlinearitäten oder Zeitabhängigkeiten in Bezug auf das Deformationsverhalten des Basismaterials herrühren. Teschner zeigt für E-Glas darüber hinaus im anwendungsrelevanten Temperaturbereich eine gegen unendlich strebende Viskosität, die auf eine zu vernachlässigende Temperaturabhängigkeit des Glasfasergewebes schließen lässt [Tes19].

Für die Epoxidharzmatrix wird hingegen, wie für Polymere üblich, die Kombination aus elastischen und viskosen Werkstoffeigenschaften angenommen, die als Viskoelastizität bezeichnet wird. Die Gesamtverformung des polymeren Werkstoffes setzt sich bei genauer Betrachtung grundsätzlich aus einem elastischen, linear-viskoelastischen, nichtlinear-viskoelastischen und

plastischen Verformungsanteil zusammen, deren Anteile bzw. Ausprägungen von der Belastungszeit und der wirkenden Temperatur abhängen. Im Bereich niedriger Temperaturen und/oder kleinen Verformungen werden die schwachen zwischenmolekularen Bindungen über die eingebrachte Energie gedehnt und benachbarte Moleküle aus der Gleichgewichtslage ausgelenkt. Bei Entlastung kehren die Molekülketten wieder in ihre Ausgangslage zurück, wodurch die Dehnung in diesem Bereich vollständig reversibel ist. Die elastische Verformung kann für duroplastische Polymere, aber auch für gefüllte und/oder faserverstärkte Thermoplasten bei geringen Beanspruchungszeiten und niedrigen Temperaturen im Bereich von Belastungen bis zu 40 % der Bruchspannung stattfinden [Gre15]. Im anwendungsrelevanten Temperaturbereich ist jedoch bereits bei kleinen Verformungen ein zunächst linear-viskoelastisches Werkstoffverhalten zu erwarten. Für höhere Verformungen zeigt das Werkstoffverhalten darüber hinaus eine Abhängigkeit von der Belastungshöhe, die als nichtlineare Viskoelastizität bzw. Viskoplastizität bezeichnet wird. Bei aufgebrachter Verformung finden zunächst reversible Umlagerungen bspw. durch Rotationsbewegungen von Molekülabschnitten statt, die als Relaxationsprozesse bezeichnet werden und zu einem Abbau der anliegenden mechanischen Spannung führen. Dazu muss zunächst eine Aktivierungsenergie überwunden werden, wodurch für die Relaxationsprozesse eine Zeitabhängigkeit folgt. Bei langer Versuchszeit und/oder hohen Temperaturen steigt folglich die Wahrscheinlichkeit von Relaxationsprozessen, die für das viskoelastische Verhalten von Polymeren verantwortlich sind. Inhomogenitäten oder Defekte führen im Folgenden durch geringfügige, lokale Spannungsüberhöhungen zur Bildung mikroskopisch kleiner Hohlräume (sogenannter Crazes), die von Fibrillen überbrückt werden. Die Konsequenz ist eine Relaxation durch eine plastische bzw. irreversible Deformation des Polymers. Die weitere Materialbeanspruchung führt zum Wachstum des Crazes, wodurch weitere Fibrillen abgeschnürt und jene im Inneren des Crazes gelängt werden, bevor sie schließlich brechen. Das Wachstum des Crazes bei konstanter Belastung führt zu einer Zeitabhängigkeit der plastischen Verformung. Ausreichend große Crazes führen schließlich zum Bruch des Materials. ([Eye05], [Rös06], [Ber08], [Men11], [Gre15])

Wie bereits erwähnt, sind Epoxidharze nach der vollständigen Vernetzung nicht mehr schmelzbar und zählen folglich zur Gruppe der Duroplaste [Eye05]. Erst bei hohen Temperaturen beginnt das Material zu erweichen, wodurch eingeschränkt Bewegungen der Kettensegmente des Polymers möglich werden ([Lu08], [Eye05]). Der Übergang vom glasartigen in den viskosen Zustand wird als Glasübergang bei der entsprechenden Glasübergangstemperatur T_g bezeichnet und dient häufig zur Klassifikation von Epoxidharzsystemen [Lu08].

Die exakten thermomechanischen Eigenschaften der epoxidharzbasierten Polymermatrix hängen jedoch stark von der Materialzusammensetzung ab [Eye05]. Letztere ist für Leiterplattenbasismaterialien aufgrund strenger Geheimhaltungsrichtlinien der Hersteller kaum nachzuvollziehen. Die Art und Ausprägung der oberhalb beschriebenen mechanischen Verformungseigenschaften oder die Glasübergangstemperatur variieren somit zwischen den Basismaterialien und sind experimentell zu ermitteln.