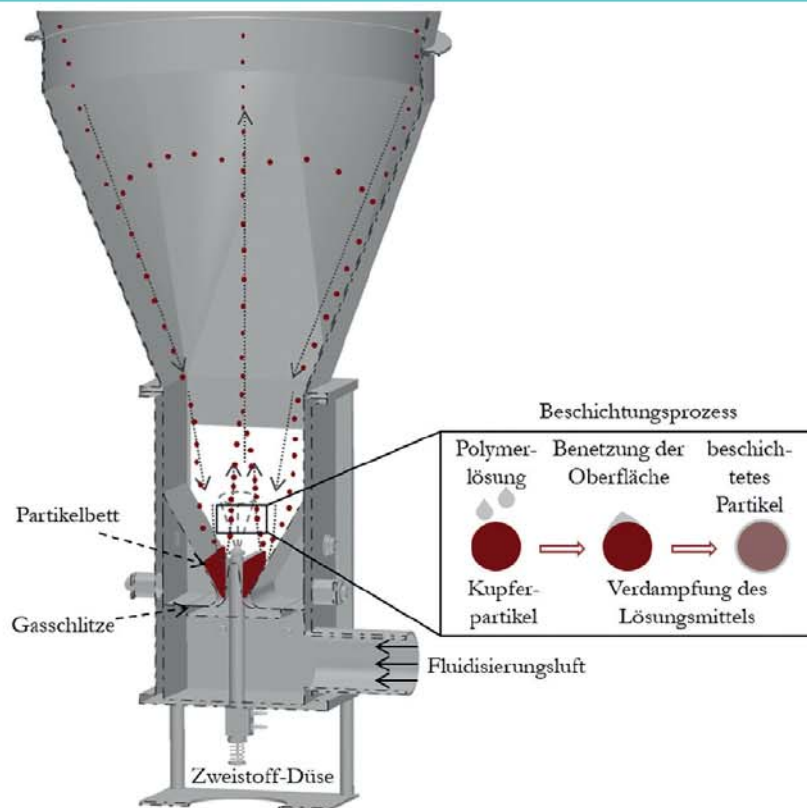


Eduard Eichner

# Herstellung von hochgefüllten Kupfer-Polymer-Kompositen mittels eines Strahlschicht-Beschichtungsverfahrens und ihre Analyse





Herstellung von hochgefüllten Kupfer-Polymer-Kompositen mittels eines  
Strahlschicht-Beschichtungsverfahrens und ihre Analyse





# **Herstellung von hochgefüllten Kupfer-Polymer-Kompositen mittels eines Strahlschicht-Beschichtungsverfahrens und ihre Analyse**

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Eduard Eichner

aus

Rasdolnoe (Kasachstan)

2019



## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2019

Zugl.: (TU) Hamburg, Univ., Diss., 2019

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Stefan Heinrich

2. Gutachter: Prof. Dr. Gerold A. Schneider

Tag der mündlichen Prüfung: 27.09.2019

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2019

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2019

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-7096-0

eISBN 978-3-7369-6096-1



## Kurzfassung

Biologische Verbundwerkstoffe weisen sehr hohe Füllgrade an Verstärkermaterial und einen komplexen hierarchischen Aufbau auf. Durch die Kombination der beiden Merkmale werden ihre hervorragenden mechanischen Eigenschaften bestimmt. Seit Jahren wird versucht, die mechanischen Eigenschaften der natürlichen Komposite durch künstlich erzeugte Komposite zu erreichen. Doch die künstlich hergestellten Komposite haben nach wie vor geringere Füllgrade, und die Struktur konnte noch nicht identisch nachgebildet werden, deswegen erreichen die hergestellten Komposite die mechanischen Eigenschaften der biologischen Komposite nicht.

Einer der Strukturmerkmale, die biologische Komposite haben, ist das Aspektverhältnis. Komposite mit einem höheren Aspektverhältnis weisen bessere mechanische Eigenschaften auf. Deswegen wird in dieser Arbeit der Einfluss des Aspektverhältnisses auf die mechanischen Eigenschaften von Kompositen untersucht. Als Material wird in dieser Arbeit metallisches Kupfer als Verstärker zu einem Polymer, dem Polyvinylbutyral (PVB), verwendet. Kupfer ist ein relativ weiches Material und kann durch Krafteinwirkung verformt werden. Dadurch kann das Aspektverhältnis der Partikel erhöht werden. Bevor die Kupferpartikel verformt werden, werden sie in einer speziell für das Prozessieren von feinen Partikeln gebauten Strahlschichtanlage mit PVB beschichtet. Kupfer ist ein elektrisch leitendes Material und PVB ist ein Isolator, weshalb zur Analyse der Beschichtungsqualität der spezifische Widerstand der Komposite bestimmt wird. Neben dem elektrischen Widerstand wird für die potenzielle Anwendung der Komposite in der Elektronik auch die relative Permittivität bestimmt.

Als mechanischen Eigenschaften werden der Elastizitätsmodul, die Festigkeit und die Bruchzähigkeit der Komposite bestimmt. Dabei werden die Eigenschaften von Kompositen mit sphärischen Partikeln mit den Eigenschaften von Kompositen mit gewalzten Partikeln verglichen. Das Walzen wird genutzt, um das Aspektverhältnis der Partikel zu erhöhen. Für die Untersuchung werden Kupferpartikel unterschiedlicher Größen verwendet.

Neben der experimentellen Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Komposite wird die Struktur der Komposite mit feinen sphärischen Partikeln approximiert und mit Hilfe der deterministischen Diskreten-Elemente-Methode (DEM) modelliert. Anschließend werden der Elastizitätsmodul sowie die Festigkeit der modellierten Komposite simulativ mittels DEM bestimmt und mit den experimentell ermittelten Werten verglichen.



## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	i
Inhaltsverzeichnis .....	ii
Abbildungsverzeichnis .....	v
Tabellenverzeichnis .....	ix
Symbolverzeichnis .....	xi
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Verbundwerkstoffe, ihre Eigenschaften und Herstellungsmethoden .....</b>	<b>8</b>
2.1 Einzelkomponenten der Verbundwerkstoffe .....	8
2.1.1 Keramiken .....	8
2.1.2 Metalle .....	10
2.1.3 Polymere .....	11
2.2 Typen von Kompositen .....	12
2.2.1 Natürliche Komposite .....	12
2.2.2 Keramik-Polymer-Komposite .....	14
2.2.3 Metall-Polymer-Komposite .....	17
2.2.4 Polymer-Komposite mit elongierten Partikeln .....	17
2.2.5 Andere Typen der Komposite .....	19
2.3 Eigenschaften der Komposite .....	20
2.3.1 Mechanische Eigenschaften .....	20
2.3.2 Elektrische Eigenschaften .....	26
2.4 Herstellungsmethoden der Komposite .....	27
<b>3 Wirbelschicht- und Strahlschichttechnologien .....</b>	<b>30</b>
3.1 Wirbelschichttechnologie .....	30
3.2 Strahlschichttechnologie .....	33
3.3 Klassifizierung der Pulver .....	36
3.4 Beschichten und Agglomerieren in Wirbel- und Strahlschichten .....	38
3.5 Modellierung von Wirbel- und Strahlschichten .....	40
<b>4 Materialien und Methoden .....</b>	<b>41</b>
4.1 Materialien .....	41
4.2 Beschichtung in der Strahlschicht .....	43
4.2.1 Strahlschichtapparat .....	43
4.2.2 Beschichtung der Kupferpartikel .....	45
4.2.3 Herstellung der Polymerlösung .....	47
4.2.4 Sicherheitstechnische Betrachtung der Anlage .....	48
4.3 Herstellung der Komposite .....	49
4.3.1 Walzen .....	49



4.3.2	Pressen .....	50
4.3.3	Weitere Bearbeitungsschritte .....	51
4.4	Charakterisierungsmethoden .....	52
4.4.1	Optische Messung der Partikelgröße.....	52
4.4.2	Lichtmikroskopie.....	53
4.4.3	Rasterelektronenmikroskopie (REM).....	54
4.4.4	Thermogravimetrische Analyse (TGA).....	54
4.4.5	Spezifischer Widerstand .....	55
4.4.6	Relative Permittivität.....	55
4.4.7	Elastizitätsmodul und Festigkeit .....	57
4.4.8	Bruchzähigkeit .....	58
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion der experimentellen Untersuchungen .....</b>	<b>61</b>
5.1	Klassifizierung der Pulver.....	61
5.2	Partikelaustrag .....	62
5.3	Analyse der Granulatgröße.....	63
5.4	Zusammensetzung der Komposite .....	67
5.5	Elektrische Eigenschaften .....	68
5.5.1	Spezifischer Widerstand .....	68
5.5.2	Relative Permittivität.....	71
5.6	Mechanische Eigenschaften .....	75
5.6.1	Elastizitätsmodul und Festigkeit .....	75
5.6.2	Bruchzähigkeit .....	89
5.6.3	Diskussion .....	94
<b>6</b>	<b>Modellierung der Belastung der Komposite mit der Diskreten-Elemente-Methode. 97</b>	
6.1	Die Diskrete Elemente Methode (DEM) .....	98
6.1.1	Grundgleichungen und Kontaktmodelle .....	99
6.1.2	Kontaktgesetze .....	100
6.1.3	Bonded-Particle-Modell (BPM).....	103
6.1.4	Elastisches Modell für die Feststoffbrücken .....	104
6.1.5	MULTiscale Simulation ENvironment .....	106
6.2	Generierung der Proben für die DEM-Simulationen .....	107
6.2.1	Probengenerierung und Simulationsparameter.....	107
6.2.2	Voruntersuchungen.....	111
6.2.3	Materialeigenschaften für die Simulation.....	112
6.3	Ergebnisse der simulativen Untersuchungen .....	113
6.3.1	Ergebnisse der Voruntersuchungen .....	113
6.3.2	Simulationen mit feinen Partikeln.....	114





6.3.3	Zusammenfassung und Ausblick der Simulationen .....	119
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>121</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>124</b>
1.	Messkorrekturen der Kraftwerte .....	124
2.	Koeffizienten von $A_{\nu\mu}$ .....	124
3.	Bruchzähigkeit.....	125
<b>9</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>126</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Ansicht der inneren Perlmutter-Schicht der roten Abalone-Muschel (links oben); Typischer Aufbau von Muscheln mit Perlmutter (links unten); Schematische Darstellung der Anordnung von Plättchen in Perlmutter (rechts oben); REM-Bild der Bruchfläche in Perlmutter (rechts unten) (aus Barthelat et al., 2007). .....	2
Abbildung 1.2: Konzept des hierarchischen Aufbaus eines Smartphone-Gehäuses (SFB 986). Von links nach rechts: beschichtetes Nanopartikel, Agglomerat der 1. Hierarchieebene, Agglomerate der 2. Hierarchieebene aufgebaut aus den Agglomeraten der 1. Hierarchieebene, Smartphone-Verkleidung aufgebaut aus den Agglomeraten der 2. Hierarchieebene.....	3
Abbildung 1.3: Perfekt angeordnete keramische Plättchen in einer Polymermatrix (nach Gao, 2006). $L$ ist die Länge und $h$ die Höhe der Plättchen. ....	4
Abbildung 1.4: Schematische Darstellung einer Strahlschichtanlage.....	5
Abbildung 1.5: Ausschnitt eines Biegebalkens zur Durchführung von DEM-Simulationen der Biegeversuche mit MUSEN. ....	6
Abbildung 2.1: Prozessschritte für den Aufbau von synthetischem Perlmutter (nach Mao et al., 2016).....	15
Abbildung 2.2: Einfluss der Verstärkungsart auf die Festigkeit eines Kunststoffes (nach Lengsfeld et al., 2015). ....	18
Abbildung 2.3: Eine typische Spannungs-Dehnungs-Kurve. ....	20
Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des Gefüges von Fasern bzw. Plättchen in der Polymermatrix: a) senkrecht, b) parallel zur Richtung der Fasern bzw. Plättchen, c) durch Partikel verstärktes Polymergefüge (nach Hornbogen et al., 2017).....	21
Abbildung 2.5: Spannungsverteilungen im idealen Körper (links), im Körper mit Kerbe mit einem bestimmten Radius (Mitte) und im Körper mit einem Riss (rechts). ....	24
Abbildung 3.1: Wirbelschichtanlage und unterschiedliche Zustände in einer Wirbelschicht. ....	31
Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Partikelbewegung in einer konisch-zylindrischen Strahlschicht.....	33
Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Strömungszustände der Partikel in einer prismatischen Strahlschicht. Links: dichter Strömungszustand, rechts: verdünnter Strömungszustand.....	35
Abbildung 3.4: Diagramm für die Klassifizierung der Pulver bei der Fluidisation mit Luft (Geldart, 1973).....	36

Abbildung 4.1: Strukturformel von Polyvinylbutyral-Molekül (Kuraray Europe GmbH).....	42
Abbildung 4.2: Fließschema der genutzten Strahlschichtanlage.....	43
Abbildung 4.3: Foto der genutzten Strahlschichtanlage.....	44
Abbildung 4.4: Schematische Darstellung der Beschichtung von Kupferpartikeln in der Strahlschicht.....	46
Abbildung 4.5: a) Zweistoffdüse Modell 970 der Firma Düsen-Schlick GmbH. b) Funktionsweise einer Zweistoffdüse mit externer Tröpfchenerzeugung.....	47
Abbildung 4.6: Schema und Foto der handbetriebenen Blechwalze W40, die zum Verformen der Partikel eingesetzt wurde.....	49
Abbildung 4.7: Querschnitt der Pressmatrize zur Herstellung von Composite-Tabletten.....	50
Abbildung 4.8: Schritte der Herstellung der Kupfer-PVB-Verbundwerkstoffe. Von links nach rechts: unbehandelte Kupferpartikel, beschichtete Partikel (Granulat), Pressling, Biegestäbchen.....	51
Abbildung 4.9: Links: Eine Probe angekerbt mit Sägeblatt mit einem größeren Kerbradius; rechts: Die Probe angeschnitten mit einem geschärften, geringeren Kerbradius (Single-Egded-V-Notched-Beam).....	52
Abbildung 4.10: Messprinzip der dynamischen Bildanalyse mit dem Camsizer XT (Retsch Technology GmbH).....	53
Abbildung 4.11: Schematische Darstellung einer Kupfer-PVB Tablette mit einer dünnen Schicht aus Silberpaste.....	56
Abbildung 4.12: Schematischer Aufbau der Vier-Punkt-Biegung mit den Kräften auf die Auflagerrollen und Momentenverteilung in der Probe.....	57
Abbildung 4.13: Schematischer Aufbau der Drei-Punkt-Biegung mit den Kräften auf die Auflagerrollen und Momentenverteilung in der Probe.....	59
Abbildung 5.1: Klassifizierung nach Geldart (1973) der in der Arbeit verwendeten Pulver (Punkte 1 und 2) sowie der von Wolff et al. (2014) (Punkt 3) und Brandt et al. (2013a) (Punkt 4) verwendeten Pulver. Alle Pulver wurden in der in dieser Arbeit verwendeten Strahlschicht beschichtet. Die graue Fläche zeigt den typischen Anwendungsbereich der Strahlschichttechnologie.....	61
Abbildung 5.2: Summenverteilung der feinen Kupferpartikel vor und nach dem Prozessieren bei 25 m <sup>3</sup> /h in der Strahlschicht.....	63
Abbildung 5.3: Summenverteilung der feinen Kupferpartikel im Anfangszustand und nach dem Prozessieren bei 25 m <sup>3</sup> /h in der Strahlschicht. Und Summenverteilung des Granulats nach der Beschichtung in der Strahlschicht mit einem Kupferanteil von 75 Vol.%.....	64

Abbildung 5.4: REM-Aufnahmen links von feinen Kupferpartikeln ( $d_p=29,5 \mu\text{m}$ ) und rechts vom Granulat nach der Beschichtung mit einem Kupferanteil von 62,3 Vol. %.....	65
Abbildung 5.5: Summenverteilung der gröbereren Kupferpartikel im Anfangszustand und Summenverteilung des Granulats nach der Beschichtung in der Strahlschicht mit einem Kupferanteil von 74,6 Vol. % .....	65
Abbildung 5.6: REM-Aufnahmen links von gröbereren Kupferpartikeln ( $d_p=260 \mu\text{m}$ ) und rechts vom Granulat nach der Beschichtung mit einem Kupferanteil von 72,7 Vol. %.....	66
Abbildung 5.7: Thermogravimetrische Analyse vom reinen Polymer PVB 30H und von zwei Granulaten mit einem Volumenanteil an Kupfer von 60,6 % beziehungsweise 78,1 %.....	67
Abbildung 5.8: Spezifischer Widerstand der Kupfer-Polymer-Komposite mit feinen Kupferpartikeln ( $d_p=29,5 \mu\text{m}$ ) abhängig vom Volumenanteil des Kupfers. Bei 100 Vol. % an Kupfer wurden reine Kupferpartikel zum Bulkmaterial gepresst.....	69
Abbildung 5.9: Relative Permittivität der Kupfer-Polymer-Komposite mit feinen Kupferpartikeln ( $d_p=29,5 \mu\text{m}$ ) abhängig vom Volumenanteil des Kupfers. ....	71
Abbildung 5.10: Relative Permittivität der Metall-Polymer-Komposite abhängig vom Volumenanteil des Metalls. Vergleich der Ergebnisse dieser Arbeit mit der Arbeit von Dang et al. (2004) mit Kohlefasern (CF), Kupfer und Nickel in Polyethylen niedriger Dichte (LDPE), der Arbeit von Dang et al. (2008) mit Silber in einem Polyimid, der Arbeit von Qi et al. (2005) mit Silber in Epoxid, und der Arbeit von Li et al. (2006) mit Stahlfasern in Polyvinylidenfluorid (PVDF). ....	73
Abbildung 5.11: Elastizitätsmodul von Kupfer-Polymer-Kompositen mit feinen sphärischen Partikeln abhängig vom Kupferanteil. ....	76
Abbildung 5.12: Biegefestigkeit von Kupfer-Polymer-Kompositen mit feinen sphärischen Partikeln abhängig vom Kupferanteil. ....	77
Abbildung 5.13: REM-Aufnahme der Bruchfläche von Kompositen mit 60,6 Vol. % an Kupfer.	79
Abbildung 5.14: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Kupfer-Polymer-Kompositen mit feinen sphärischen und gewalzten Partikeln bei einem Kupferanteil im Granulat von 75,1 Vol. %..	80
Abbildung 5.15: Elastizitätsmodul von Kupfer-Polymer-Kompositen mit feinen sphärischen und gewalzten Partikeln abhängig vom Kupfervolumenanteil. ....	81
Abbildung 5.16: Biegefestigkeit von Kupfer-Polymer-Kompositen mit feinen sphärischen und gewalzten Partikeln abhängig vom Kupfervolumenanteil. ....	82
Abbildung 5.17: Seitliche Lichtmikroskop-Aufnahme des Gefüges von Kupfer-Polymer-Kompositen mit feinen gewalzten Partikeln und einem Kupferanteil von 62,4 Vol. %.....	83

Abbildung 5.18: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Kupfer-Polymer-Kompositen mit gröberem sphärischen und gewalzten Partikeln ( $d_p=260 \mu\text{m}$ ) bei einem Kupferanteil im Granulat von 71,1 Vol.%. .....	84
Abbildung 5.19: Elastizitätsmodul von Kupfer-Polymer-Kompositen mit gröberem sphärischen und gewalzten Partikeln abhängig vom Kupfervolumenanteil. ....	85
Abbildung 5.20: Biegefestigkeit von Kupfer-Polymer-Kompositen mit gröberem sphärischen und gewalzten Partikeln abhängig vom Kupfervolumenanteil. ....	86
Abbildung 5.21: a) Seitliche REM-Aufnahme der Bruchfläche des Komposites mit gröberem gewalzten Partikeln, Aufnahmen mit Lichtmikroskop b) Parallel zur Pressrichtung und c) senkrecht zur Pressrichtung (seitlich).....	88
Abbildung 5.22: Bruchzähigkeit von Kupfer-Polymer-Kompositen mit gröberem sphärischen Partikeln abhängig vom Pressdruck. ....	89
Abbildung 5.23: Risswachstum bei optischer Messung der Probe mit einem Kupferanteil von 82,3 Vol.% und gewalzten gröberem Kupferpartikeln; links: ohne Riss; rechts: nach dem fortgeschrittenen Riss. ....	90
Abbildung 5.24: Bruchzähigkeit abhängig von der Rissverlängerung für eine Probe mit feinen sphärischen Partikeln und einem Kupferanteil von 65,2 Vol.%. ....	91
Abbildung 5.25: Bruchzähigkeit abhängig vom Kupferanteil für Kupfer-PVB-Komposite mit feinen sphärischen und gewalzten Partikeln. ....	92
Abbildung 5.26: Bruchzähigkeit abhängig vom Kupferanteil für Kupfer-PVB-Komposite mit gröberem sphärischen und gewalzten Partikeln. ....	93
Abbildung 5.27: Bruchzähigkeit abhängig von der Rissverlängerung für Komposite mit gröberem sphärischen und gewalzten Partikeln und einem Kupferanteil von 74,7 und 74,8 Vol.%. ....	94
Abbildung 5.28: Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit von Kompositen mit feinen sphärischen und gewalzten Partikeln. Bei der mit einem Dreieck dargestellten Probe mit gewalzten Partikeln wurden E-Modul und Festigkeit seitlich, parallel zu den ausgerichteten Partikeln, gemessen.....	95
Abbildung 6.1: Schematische Darstellung der Kräfte, die auf das Partikel i durch ein kontaktierendes Partikel j und ein nicht kontaktierendes Partikel k (hier durch Kapillarkraft) wirken (nach Zhu et al., 2007).....	100
Abbildung 6.2: Schaltplan eines elastischen Kontaktgesetzes (Jakob und Konietzky, 2012). ....	101
Abbildung 6.3: Schematische Darstellung zweier Primärpartikel verbunden durch eine Feststoffbrücke.....	105



Abbildung 6.4: Anzahlgrößenverteilung der experimentell genutzten feinen Kupferpartikel und zehn Fraktionen der Anzahlverteilung für die Simulationen.....	108
Abbildung 6.5: Schematische Darstellung des Aufbaus der Drei-Punkt-Biegeversuche in den Simulationen (Generierter Biegebalken aus feinen Partikeln und Feststoffbrücken sowie drei Auflagern).....	110
Abbildung 6.6: Vergleich der experimentellen Werte für feine Partikel mit den Ergebnissen der Simulationen mit groben Partikeln. Experimentelle Werte bei 66 Vol.% an Kupfer sind interpoliert zwischen 62,4 und 69 Vol.%. .....	114
Abbildung 6.7: Kräfteverlauf in den Polymerbrücken eines Biegebalkens zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Simulation. Die Zeit steigt von oben nach unten an. ....	115
Abbildung 6.8: Vergleich der experimentellen Werte für feine Partikel mit den Ergebnissen der Simulationen mit feinen Partikeln. Experimentelle Werte bei 66 Vol.% an Kupfer sind interpoliert zwischen 62,4 und 69 Vol.%. .....	116
Abbildung 6.9: Verlauf der Bruchkriterien nach von Mises, Tresca, Drucker-Prager und Mohr-Coulomb in zweidimensionalen Darstellung. ....	118
Abbildung 8.1: Auftragung der gemessenen Kraft nach der Zeit bei den Punkten vollständiger Entlastung. ....	124

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Vergleich der typischen Eigenschaften von Keramiken, Metallen und Polymeren (nach Pampuch, 2014). ....	9
Tabelle 4.1: Eigenschaften von Polyvinylbutyral (Kuraray Europe GmbH).....	42
Tabelle 4.2: Eigenschaften von Ethanol (Carl Roth GmbH & Co. KG). ....	42
Tabelle 5.1: Spezifische Widerstände der Kupfer-Polymer-Komposite mit feinen Kupferpartikeln ( $d_p=29,5 \mu\text{m}$ ) abhängig vom Volumenanteil des Kupfers. ....	70
Tabelle 5.2: Relative Permittivität und dielektrischer Verlust abhängig vom Kupfervolumenanteil mit feinen Kupferpartikeln ( $d_p=29,5 \mu\text{m}$ ). ....	72
Tabelle 5.3: Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit abhängig vom Kupfervolumenanteil in Kompositen mit feinen sphärischen Kupferpartikeln. ....	78
Tabelle 5.4: Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit abhängig vom Kupfervolumenanteil in Kupfer-PVB-Kompositen mit größeren sphärischen und gewalzten Kupferpartikeln ( $d_p=260 \mu\text{m}$ ). ..	87
Tabelle 6.1: Simulationsparameter zu Untersuchung der mechanischen Eigenschaften. ....	110



Tabelle 6.2: Fünf Fraktionen der Anzahlverteilung für die in den Voruntersuchungen genutzten Kupferpartikel. ....	112
Tabelle 6.3: Eigenschaften der Komponenten. ....	113
Tabelle 6.4: Wechselwirkungsparameter. ....	113
Tabelle 8.1: Koeffizienten von $A_{\nu\mu}$ für die Gleichung 4.17 (Munz und Fett 2001).....	124
Tabelle 8.2: Bruchzähigkeit in Abhängigkeit vom Kupferanteil, der Partikelgröße und Partikelform .....	125



## Symbolverzeichnis

### Abkürzungen

Ag	Silber
BaTiO <sub>3</sub>	Bariumtitanat
CaCO <sub>3</sub>	Calciumcarbonat
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethylen
CF	Kohlefasern
CFD	Computational fluid dynamics
CFPR	Verbundwerkstoffe mit Kohlenstofffasern
Cu	Kupfer
DEM	Diskrete-Elemente-Methode
FVW	Faserverbundwerkstoffe
Gew.%	Gewichtsprozent
IPMC	Verbundwerkstoffe aus ionischen Polymeren und Metallen
LDPE	Polyethylen mit niedriger Dichte
Ni	Nickel
PI	Polyimid
PVB	Polyvinylbutyral
PVDF	Polyvinylidenfluorid
SSF	Stahlfasern
TGA	Thermogravimetrische Analyse
UEG	Untere Explosionsgrenze
Vol.%	Volumenprozent

### Lateinische Symbole

$A$	Querschnittsfläche	m <sup>2</sup>
$A_{\nu\mu}$	Koeffizienten	-





$a$	Risslänge, Abstand	m
$b$	Breite	m
$C$	Elektrische Kapazität	F
$c$	Dämpfungskoeffizient	-
$d$	Durchmesser	m
$d_{32}$	Sauter-Durchmesser	m
$d_m$	Mittlerer Abstand zwischen Belastungs- und Auflagerrollen	m
$d_p$	Partikeldurchmesser	m
$E$	Elastizitätsmodul	GPa
$e$	Restitutionskoeffizient	-
$F$	Kraft	N
$f$	Gütefaktor	-
$G$	Schermodul	MPa
$g$	Erdbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
$H$	Höhe	m
$h$	Höhe, Dicke	m
$I$	Trägheitsmoment	kg·m <sup>2</sup>
$J$	Polares Trägheitsmoment	m <sup>4</sup>
$K_I$	Spannungsintensitätsfaktor	MPa m <sup>1/2</sup>
$K_{Ic}$	Kritischer Spannungsintensitätsfaktor für Modus I	MPa m <sup>1/2</sup>
$K_{IR}$	Bruchzähigkeit mit dem Belastungsmodus I	MPa m <sup>1/2</sup>
$k$	Sicherheitsfaktor	-
$k$	Relative Permittivität	-
$k$	Steifigkeit	N/m
$L$	Abstand zwischen Rollen	m