

Fortschrittsberichte aus der Produktionstechnik

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm
Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier
Universität Kassel

Band 11

Frederik Vorholt

**Klimatisch und elektrisch induzierte Degradation
hochstromtragender Klebverbindungen**

D 34 (Diss. Univ. Kassel)

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2017

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm,
Universität Kassel
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Bernd Mayer,
Institutsleiter Fraunhofer IFAM
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier,
Universität Kassel
Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach,
Universität Kassel

Tag der mündlichen Prüfung: 30. August 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5539-9
ISSN 2195-5670

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Con la moral corregimos los errores de nuestros instintos y con el amor corregimos los errores de nuestra moral.

José Ortega y Gasset

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Abteilung Klebtechnische Fertigung, als externe Promotion an der Universität Kassel, Fachbereich Maschinenbau. Die bearbeitete Fragestellung zum Einfluss klimatischer und elektrischer Lasten auf das Degradationsverhalten hochstromtragender Klebverbindungen leitete sich aus den Erkenntnissen ab, die in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojekt *eProduction* erzielt werden konnten. Im Rahmen dieser Produktionsforschung zu Hochvoltspeichersystemen für die Elektromobilität wurde seitens des IFAM u. a. die technologische Eignung leitfähig geklebter Polkontakte von Lithium-Ionen-Zellen für den Aufbau von Traktionsbatterien aufgezeigt. Darüber hinaus konnten zahlreiche anwendungsbezogene Vorteile leitfähig geklebter Zellkontakte, wie eine Bauraum- bzw. Gewichtsreduktion oder ein Zugewinn an Designfreiheit, demonstriert werden.

Gegenwärtig avanciert der Aufbau von Hochvoltspeichersystemen infolge des politisch wie gesellschaftlich postulierten Ausbaus der Elektromobilität zu einem neuen stark wachsenden Anwendungsbereich von Hochstromverbindungen. Der damit einhergehende Bedarf an prozessorientierten und innovativen Lösungen für Fügeaufgaben im Hochstrombereich motivierte den in *eProduction* verfolgten unkonventionellen klebtechnischen Lösungsansatz. Die Erzeugung gut leitender und mechanisch belastbarer Kontakte ist die Grundvoraussetzung für eine zielführende Anwendung der Füge-technik Kleben. Zusätzliche Anforderungen ergeben sich aus dem Erfordernis einer guten Alterungsbeständigkeit der Verbindungen, die in kurzen Taktzeiten generiert werden und unter speziellen Belastungen stehen, wie sie im Bereich Automotiv anzutreffen sind. Ein erfolgreicher Einsatz der Klebtechnik bei der Zellkontaktierung erfordert somit ein tiefes Verständnis für Ausfallmechanismen hochstromtragender Klebverbindungen verbunden mit zuverlässigen Lebensdauerprognosen – insbesondere aufgrund der vielfach erst nach langen Belastungszeiträumen auftretenden Änderungen qualitätsentscheidender Eigenschaften von Polymeren. Im

Gegensatz zu dem detailliert untersuchten Alterungsverhalten konventioneller elektrisch leitfähiger Klebverbindungen, die bspw. bei der Kontaktierung von elektronischen Bauteilen auf Leiterplatten zum Einsatz kommen, sind großflächig geklebte Verbindungen, die Stromstärken von mehreren hundert Ampere tragen und somit andersartigen Alterungsbedingungen ausgesetzt sind, bislang unerforscht.

Für die Förderung von Vorhaben zur Erforschung neuer Technologien und nachhaltiger Entwicklung – insbesondere auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien – sowie die finanzielle Unterstützung bei der Durchführung von Untersuchungen zu hochstromtragenden Klebverbindungen bedanke ich mich ausdrücklich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Herrn Professor Dr.-Ing. S. Böhm, dem Leiter des Fachgebiets Trennende und Fügende Fertigungsverfahren, danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Referats, für die unentwegte Unterstützung sowie für die Durchsicht des Manuskriptes.

Mein spezieller Dank gilt dem Institutsleiter des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung, Bereich Klebtechnik und Oberflächen, Herrn Professor Dr. rer. nat. B. Mayer für die Betreuung der Arbeit und das Bereitstellen idealer Arbeitsbedingungen sowie für sein stetes Interesse und seine konstruktive Kritik, die wesentlich zum Gelingen beigetragen hat.

Ich möchte mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung bedanken, die mich bei der Durchführung der Untersuchungen unterstützten. Besonders hervorheben möchte ich die tatkräftige Unterstützung der Abteilung Klebtechnische Fertigung unter der Leitung von Herrn Dipl.-Ing. M. Peschka, für dessen wohlwollende Förderung ich sehr dankbar bin.

Für ihre stete Diskussionsbreitschaft möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. T. Vallée und Herrn Dr. rer. nat. M. Kleemeier bedanken. Weiterhin gilt mein Dank Frau Dr. jur. A. Schöppner und Frau H. Berndsen für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, meinen Brüdern und Frau B. Buddenbäumer für die bedingungslose Unterstützung, für die Entlastung während der letzten Jahre sowie für die Durchsicht des Manuskriptes. Schließlich möchte ich mich für den moralischen Beistand und die uneingeschränkte Nachsicht bei meinen Freunden sowie bei Frau S. Reinermann für die vitalisierenden Ausflüge in fremde Welten bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	v
Inhaltsverzeichnis	vii
0 Kurzzusammenfassung	1
1 Einleitung	3
1.1 Aufgabenstellung	4
2 Stand der Erkenntnisse	8
2.1 Kleben	9
2.2 Elektrisch leitfähige Klebverbindungen	10
2.2.1 Epoxidharze als Matrix-Material isotrop leitfähiger Klebstoffe	14
2.2.1.1 Vernetzungsreaktionen von Epoxidharzklebstoffen	17
2.2.1.2 Eigenschaften von Epoxid-Polymeren	21
2.2.1.3 Alterungsverhalten von Epoxidpolymeren	22
2.2.2 Füllstoffe isotrop leitfähiger Klebstoffe	29
2.2.2.1 Einfluss der Geometrie	30
2.2.2.2 Einfluss der Materialeigenschaften	36
2.2.3 Füllstoff-Matrix-Wechselwirkungen	38
2.2.4 Elektronenleitung durch Klebverbindungen	40
2.2.4.1 Leitungsmechanismen	40
2.2.4.2 Einfluss von Prozessparametern auf die Leitfähigkeit	43
2.2.5 Alterungsverhalten leitfähiger Klebverbindungen	45
2.2.5.1 Einfluss der Temperatur	46
2.2.5.2 Einfluss der Feuchte	47
2.2.5.3 Einfluss des Stromflusses	49
2.3 Elektrischer Widerstand	50
2.3.1 Bestimmung elektrischer Widerstände	51
2.3.2 Kontaktgüte einer Klebverbindung	52

3	Versuchswerkstoffe	54
3.1	Klebstoffe	54
3.2	Fügewerkstoff	56
4	Versuchseinrichtungen	59
4.1	Thermische und deformationsmechanische Untersuchungen	59
4.2	Messverfahren zur Ermittlung des elektrischen Verbindungswiderstands	60
4.2.1	Versuchseinrichtung zur Widerstandsbestimmung	61
4.2.2	Bestimmung des Verbindungswiderstands	63
4.3	Versuchseinrichtung zur kontrollierten Alterung von Klebverbindungen	64
4.3.1	Alterungsversuche	66
4.3.2	Auswertung	67
5	Klebstoffcharakterisierung	68
5.1	Bestimmung der Füllstoffgeometrie	68
5.2	Bestimmung des Füllstoffgehalts	69
5.3	Bestimmung der Reaktionskinetik	71
5.4	Einfluss der Vernetzungsreaktion auf die Leitfähigkeit einer Klebverbindung	74
6	Klebschichtcharakteristik	77
6.1	Bestimmung von Bulkeigenschaften	77
6.1.1	Härtungsgrad	78
6.1.2	Viskoelastisches Verhalten und Glasübergangstemperatur	79
6.1.3	Thermomechanisches Verhalten	81
6.1.4	Feuchtesorption	83
6.2	Verbundeigenschaften	84
6.2.1	Elektrische Verbundeigenschaft	86
6.2.2	Mechanische Verbundeigenschaft	88
6.3	Einfluss der Kontaktgüte auf das Alterungsverhalten	90
6.4	Einfluss der Feuchte auf das Alterungsverhalten	92
6.4.1	Einfluss auf den Verbindungswiderstand	92
6.4.2	Einfluss auf das deformationsmechanische Verhalten	94
7	Einfluss der Stromstärke auf das Alterungsverhalten von Klebverbindungen	97
7.1	Einfluss der Stromstärke auf die Kontaktgüte	98
7.2	Einfluss der Stromstärke auf das deformationsmechanische Verhalten	101

8	Einfluss der Temperatur auf das Alterungsverhalten von Klebverbindungen	107
8.1	Einfluss der Temperatur auf die Kontaktgüte	108
8.2	Einfluss der Temperatur auf das deformationsmechanische Verhalten	110
9	Widerstandsmessung während der Auslagerung	117
9.1	Beschreibung der dynamischen Widerstandsänderung	117
9.2	Verifizierung der Modellparameter	127
9.3	Auswertung der Modellparameter	129
10	Zusammenfassung	134
11	Weiterführende Diskussion	142
	Literaturverzeichnis	xi
	Abkürzungsverzeichnis	xxiv
	Symbolverzeichnis	xxvi
	Abbildungsverzeichnis	xxix
	Tabellenverzeichnis	xxxvii
	Anhangsverzeichnis	xxxix
	Anhang	xl