I. Inhaltsverzeichnis

I. Inhaltsverzeichnis I

II. Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen IV

1 Einleitung 1

2 Zielstellung und Vorgehensweise 3

3 Stand der Erkenntnisse 5

3.1 Grundlagen Kleben 5
3.1.1 Adhäsion und Kohäsion 6
3.1.2 Klebstoffe 7
3.2 Mikrowellentechnik 8
3.2.1 Physikalische Grundlagen 8
3.2.2 Erzeugung und Übertragung von Mikrowellen 10
3.2.3 Werkstofferwärmung im Mikrowellenfeld 11
3.2.4 Rechtliche Bestimmungen und Arbeitssicherheit 15
3.3 Beschleunigte Klebstoffhärtung mit Mikrowellen 16
3.4 Partikelgefüllte Klebstoffe 16
3.5 Nanopartikel 17
3.6 Mikrowellenerwärmung nanopartikelmodifizierter Klebstoffe 19
3.6.1 Wärmeerzeugung mittels magnetischer Partikelsysteme in hochfrequenten Wechselfeldern 19
3.6.2 Ferromagnetische Resonanz 20
3.6.3 Temperaturbegrenzung bei der Mikrowellenabsorption in Nanoferriten 22

4 Versuchswerkstoffe und Prüfkörper 23

4.1 Eingesetzte Fügeteilwerkstoffe 23
4.2 Untersuchte Klebstoffe 24
4.3 Prüfkörper, Probengeometrien und Hilfsmittel 26
4.3.1 Einfach überlappte Zugscherprobe 26
4.3.2 Dicke Zugscherprobe 26
4.3.3 PTFE-Klebstofffform 27
4.3.4 Probenkörper für Härtemessung 28

5 Versuchseinrichtungen und Prüfverfahren 29

5.1 Versuchsanlage zur Mikrowellenerwärmung 29
5.1.1 Mikrowellengenerator 31
5.1.2 3-Stub-Tuner 31
5.1.3 Probenapplikator 31
5.1.4 Elektromagnet 32

5.2 Thermografiekamera 33
5.2.1 Messprinzip 33
5.2.2 Emissionsgrad 33
5.3 Goniometer 33
5.4 Oberflächenvorbehandlung 34
5.4.1 Corona-Verfahren 35
5.4.2 Niederdruckplasma 36
5.4.3 Atmosphärenplasma 36
5.4.4 Silan-Beflammung 37
5.5 Dynamische-Differenz-Kalorimetrie (DDK) 37
5.6 Dynamisch Mechanische Analyse (DMA) 40
5.7 Zugscherprüfung unter quasistatischer Belastung 44
5.8 Zugscherprüfung unter schlagartiger Belastung 45
5.9 Ermittlung des Schubspannungs-Gleitungs-Verhaltens 45
5.10 Konvektionsofen, Klimakammer, Heizpresse, Härteprüfung und Dichtemessung 47

6 Partikelmodifikation der zu untersuchenden Klebstoffe 50

7 Absorptions- und Erwärmungsverhalten ausgewählter Fügeteilwerkstoffe im Mikrowellenfeld 51
7.1 Einstellen der Mikrowellen-Versuchsanlage 51
7.2 Polymerbasierte Werkstoffe PP-LGF30 und SMC 53
7.2.1 Versuchsaufbau und Versuchrandbedingungen 53
7.2.2 Ermittlung des Erwärmverhaltens der Werkstoffe PP-LGF30 und SMC bei unterschiedlicher MW-Leistung und zunehmendem elektrischen Feldanteil 54
7.3 Erwärmverhalten metallischer Fügeteile im Mikrowellenfeld 57
7.3.1 Verwendete Werkstoffe, Versuchsaufbau und Versuchsrandbedingungen 57
7.3.2 Untersuchungsergebnisse zum Erwärmverhalten metallischer Fügeteile im Mikrowellenfeld 59
7.3.3 Diskussion der Ergebnisse 67

8 Einflussfaktoren auf die Mikrowellenerwärmung nanopartikelmodifizierter Klebverbindungen 69
8.1 Einfluss der Vormagnetisierung und Temperaturbegrenzung 69
8.2 Einfluss der Klebschichtdicke bzw. der Klebstoffmasse 73
8.3 Einfluss der Probenpositionierung im elektromagnetischen Feld 74
8.4 Temperaturverteilung in der Klebverbindung (9-Punkt-Probe) 76
8.5 Einfluss metallischer Fügeteile auf die Klebstoffhärtung mittels Mikrowellenerwärmung 81
8.5.1 Elektrische Überschläge 81

8.5.2 Wärmeableitung 82
8.5.3 Ableitung des überlagerten Magnetfelds durch ferromagnetische Fügeteile 83

9 Einfluss der Partikelmodifikation auf die Klebstoffeigenschaften 85
9.1 DDK-Analysen zur Ermittlung des Reaktionsverhaltens 85
9.1.1 Epoxidharz-Klebstoffe EP 304 und EP 304M 85
9.1.2 Polyurethan-Klebstoffe PU 120_1 und PU 120_1M 89
9.2 DMA-Messung zur Ermittlung der dynamisch mechanischen Klebstoffeigenschaften 94
9.2.1 Epoxidharz-Klebstoffe EP 304 und EP 304M 94
9.2.2 Polyurethan-Klebstoffe PU 120_1 und PU 120_1M 95
9.3 Ermittlung des Schubspannungs-Gleitungs-Verhaltens 97
9.4 Bestimmung der Klebstoffhärte nach dem Kugeleindringversuch 102
9.5 Bestimmung der Dichte 103
9.6 Diskussion der Ergebnisse zum Einfluss der Partikelmodifikation auf die Klebstoffeigenschaften 104

10 Oberflächenvorbehandlung der Fügeteilwerkstoffe SMC und PP 106
10.1 Kontaktwinkelmessung 106
10.2 Ermittlung der Verbindungseigenschaften in Abhängigkeit der Oberflächenvorbehandlung 108

11 Einfluss einer beschleunigten Alterung auf die Verbindungseigenschaften partikelmodifizierter und unmodifizierter SMC-SMC Klebverbindungen 110
11.1 Probenherstellung und Versuchsrandbedingungen 110
11.2 Verbindungsfestigkeiten unter quasistatischer Belastung 111
11.3 Verbindungsfestigkeiten unter dynamisch schlagartiger Belastung 113
11.4 Diskussion der Ergebnisse 116

12 Verbindungseigenschaften mikrowellengehärteter Stahl-SMC-Zugscherproben unter quasistatischer Belastung 117

13 Debonding durch Mikrowellenerwärmung 121
13.1 Allgemeines 121
13.2 Versuchsdurchführung 121

14 Zusammenfassung 124

15 Literaturverzeichnis 128