

---

# Inhaltsverzeichnis

|   |       |
|---|-------|
| Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen . . . . . | XXVII |
|---|-------|

|                      |   |
|----------------------|---|
| Einleitung . . . . . | 1 |
|----------------------|---|

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>1</b> | <b>Einteilung und Aufbau der Klebstoffe . . . . .</b> | <b>3</b> |
| 1.1      | Begriffe und Definitionen . . . . .                   | 3        |
| 1.2      | Einteilung der Klebstoffe . . . . .                   | 4        |
| 1.2.1    | Einteilung nach der chemischen Basis . . . . .        | 4        |
| 1.2.2    | Einteilung nach dem Abbindemechanismus . . . . .      | 5        |
| 1.3      | Aufbau der Klebstoffe . . . . .                       | 7        |
| 1.3.1    | Chemischer Aufbau der Monomere . . . . .              | 8        |
| 1.3.2    | Aufbau der Polymere . . . . .                         | 10       |
| 1.3.2.1  | Reaktionsmechanismen zur Polymerbildung . . . . .     | 10       |
| 1.3.2.2  | Struktur der Polymere . . . . .                       | 11       |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>2</b>  | <b>Klebstoffgrundstoffe . . . . .</b>                      | <b>15</b> |
| 2.1       | Polymerisationsklebstoffe . . . . .                        | 15        |
| 2.1.1     | Einkomponenten-Polymerisationsklebstoffe . . . . .         | 17        |
| 2.1.1.1   | Cyanacrylatklebstoffe . . . . .                            | 17        |
| 2.1.1.1.1 | Chemischer Aufbau . . . . .                                | 17        |
| 2.1.1.1.2 | Eigenschaften und Verarbeitung . . . . .                   | 18        |
| 2.1.1.1.3 | Primer und Aktivatoren für Cyanacrylatklebstoffe . . . . . | 22        |
| 2.1.1.2   | Anaerobe Klebstoffe (Diacrylsäureester) . . . . .          | 23        |
| 2.1.1.2.1 | Chemischer Aufbau . . . . .                                | 24        |
| 2.1.1.2.2 | Härtungsreaktionen . . . . .                               | 25        |
| 2.1.1.2.3 | Beschleuniger und Aktivatoren . . . . .                    | 28        |
| 2.1.1.2.4 | Eigenschaften und Anwendungen . . . . .                    | 29        |
| 2.1.1.3   | Strahlungshärtende Klebstoffe . . . . .                    | 31        |
| 2.1.1.3.1 | Allgemeine Betrachtungen . . . . .                         | 31        |
| 2.1.1.3.2 | Aufbau strahlungshärtender Klebstoffsysteme . . . . .      | 31        |
| 2.1.1.3.3 | Reaktionsmechanismen . . . . .                             | 33        |
| 2.1.1.3.4 | UV-Strahlung . . . . .                                     | 34        |
| 2.1.1.3.5 | Energetische Betrachtungen . . . . .                       | 35        |
| 2.1.1.3.6 | UV-Strahler . . . . .                                      | 36        |
| 2.1.1.3.7 | Reflektoren . . . . .                                      | 38        |
| 2.1.1.3.8 | Photoinitiatoren . . . . .                                 | 39        |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| 2.1.1.3.9  | Photosensibilisatoren . . . . .   | 42 |
| 2.1.1.3.10 | Kationische Strahlungshärtung . . . . .                                   | 42 |
| 2.1.1.3.11 | Lichthärtung . . . . .  | 43 |
| 2.1.1.3.12 | Kombinationshärtung . . . . .   | 44 |
| 2.1.1.3.13 | Elektronenstrahlhärtung . . . . .   | 44 |
| 2.1.1.3.14 | Laserstrahlhärtung . . . . .  | 47 |
| 2.1.1.3.15 | Anwendungen . . . . .   | 47 |
| 2.1.1.4    | Aerobe Klebstoffe . . . . .   | 48 |
| 2.1.2      | Zweikomponenten-Polymerisationsklebstoffe . . . . .                       | 49 |
| 2.1.2.1    | Methacrylatklebstoffe . . . . .   | 50 |
| 2.1.2.2    | Verarbeitungssysteme der Methylmethacrylatklebstoffe . . . . .            | 52 |
| 2.1.3      | Polymere Grundstoffe . . . . .  | 55 |
| 2.1.3.1    | Polyvinylacetat (PVAC) . . . . .  | 56 |
| 2.1.3.2    | Polyvinylalkohol (PVAL) . . . . .   | 56 |
| 2.1.3.3    | Polyvinylether . . . . .  | 57 |
| 2.1.3.4    | Ethylen-Vinylacetat (EVA) . . . . .                                       | 58 |
| 2.1.3.5    | Ethylen-Acrylsäure-Copolymere . . . . .                                   | 59 |
| 2.1.3.6    | Polyvinylacetale . . . . .  | 59 |
| 2.1.3.7    | Polystyrol (PS) . . . . .   | 60 |
| 2.1.3.8    | Polyvinylchlorid (PVC) . . . . .  | 61 |
| 2.1.3.9    | Polyvinylidenchlorid (PVDC) . . . . .                                     | 61 |
| 2.1.4      | Kautschukpolymere . . . . .   | 62 |
| 2.1.4.1    | Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR) . . . . .                                 | 62 |
| 2.1.4.2    | Styrol-Blockpolymere . . . . .  | 63 |
| 2.1.4.3    | Chloroprenkautschuk (CR) . . . . .  | 66 |
| 2.1.4.4    | Nitrilkautschuk (NBR) . . . . .   | 68 |
| 2.1.4.5    | Butylkautschuk (IIR) . . . . .  | 68 |
| 2.1.4.6    | Polybutene . . . . .  | 69 |
| 2.1.5      | Sonstige Thermoplaste . . . . .   | 69 |
| 2.1.5.1    | Polyethylen (PE) . . . . .  | 69 |
| 2.1.5.2    | Polypropylen (PP) . . . . .   | 70 |
| 2.1.5.3    | Fluorierte Kohlenwasserstoffe (Fluorthermoplaste) . . . . .               | 72 |
| 2.2        | Polyadditionsklebstoffe . . . . .   | 73 |
| 2.2.1      | Epoxidharzklebstoffe (EP) . . . . .                                       | 73 |
| 2.2.1.1    | Aufbau der Epoxidharze . . . . .  | 73 |
| 2.2.1.2    | Vernetzungsreaktionen der Epoxidharze . . . . .                           | 77 |
| 2.2.1.3    | Kalthärtende Epoxidharzklebstoffe . . . . .                               | 82 |
| 2.2.1.4    | Warmhärtende Epoxidharzklebstoffe . . . . .                               | 83 |
| 2.2.1.5    | Zweikomponenten-Epoxidharzklebstoffe . . . . .                            | 84 |
| 2.2.1.6    | Lösungsmittelhaltige Epoxidharzklebstoffe . . . . .                       | 85 |
| 2.2.1.7    | Zähnharte („toughened“) Epoxidharzklebstoffe . . . . .                    | 85 |
| 2.2.1.8    | Reaktive Epoxidharzschmelzklebstoffe . . . . .                            | 90 |
| 2.2.1.9    | Pulverförmige Epoxidharzklebstoffe . . . . .                              | 91 |
| 2.2.2      | Polyurethanklebstoffe (PUR) . . . . .                                     | 92 |
| 2.2.2.1    | Feuchtigkeitshärtende Einkomponenten-Polyurethan-<br>klebstoffe . . . . . | 96 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| 2.2.2.2   | Zweikomponenten-Polyurethanklebstoffe . . . . .            | 97  |
| 2.2.2.3   | Polyurethandispersionen . . . . .                          | 98  |
| 2.2.2.3.1 | Emulgatorhaltige Dispersionen . . . . .                    | 98  |
| 2.2.2.3.2 | Emulgatorfreie Dispersionen . . . . .                      | 98  |
| 2.2.2.4   | Lösungsmittelhaltige Polyurethanklebstoffe . . . . .       | 101 |
| 2.2.2.5   | Reaktive Polyurethan-Schmelzklebstoffe . . . . .           | 101 |
| 2.2.2.6   | Thermisch aktivierbare Polyurethanklebstoffe . . . . .     | 104 |
| 2.2.2.7   | Radikalisch vernetzende Polyurethanklebstoffe . . . . .    | 105 |
| 2.2.2.8   | Polyurethan-Elastomere . . . . .                           | 106 |
| 2.2.3     | Polycyanurate . . . . .                                    | 107 |
| 2.3       | Polykondensationsklebstoffe . . . . .                      | 107 |
| 2.3.1     | Formaldehydkondensate . . . . .                            | 108 |
| 2.3.1.1   | Phenol-Formaldehydharz-Klebstoffe (PF) . . . . .           | 108 |
| 2.3.1.2   | Kresol-/Resorzin-Formaldehydharz-Klebstoffe . . . . .      | 111 |
| 2.3.1.3   | Harnstoff-Formaldehydharz-Klebstoffe (UF) . . . . .        | 111 |
| 2.3.1.4   | Melamin-Formaldehydharz-Klebstoffe . . . . .               | 113 |
| 2.3.1.5   | Formaldehydemissionen . . . . .                            | 114 |
| 2.3.2     | Polyamide (PA) . . . . .                                   | 114 |
| 2.3.3     | Polyester . . . . .  | 117 |
| 2.3.3.1   | Gesättigte Polyester und Copolyester . . . . .             | 117 |
| 2.3.3.2   | Ungesättigte Polyester . . . . .                           | 120 |
| 2.3.4     | Silicone . . . . .   | 121 |
| 2.3.4.1   | Einkomponenten-RTV-Systeme . . . . .                       | 122 |
| 2.3.4.2   | Zweikomponenten-RTV-Systeme . . . . .                      | 124 |
| 2.3.4.3   | Siloxan-Dispersionen . . . . .                             | 127 |
| 2.3.4.4   | Silicon-Trennmittel . . . . .                              | 127 |
| 2.3.4.5   | Silanmodifizierte (MS) Polymere . . . . .                  | 129 |
| 2.3.4.5.1 | Aufbau der MS-Polymere . . . . .                           | 129 |
| 2.3.4.5.2 | Eigenschaften und Verarbeitung . . . . .                   | 130 |
| 2.3.4.5.3 | Modifikationen von MS-Dichtstoffen . . . . .               | 131 |
| 2.3.5     | Polyimide (PI) . . . . .                                   | 132 |
| 2.3.6     | Polybenzimidazole . . . . .                                | 134 |
| 2.3.7     | Polysulfone . . . . .                                      | 135 |
| 2.3.8     | Polysulfide . . . . .                                      | 136 |
| 2.4       | Zusammenfassende Darstellung der Polyreaktionen . . . . .  | 138 |
| 2.5       | Klebstoffe auf natürliche Basis . . . . .                  | 141 |
| 2.5.1     | Klebstoffe auf Basis tierischer Naturprodukte . . . . .    | 142 |
| 2.5.1.1   | Klebstoffe auf Glutininbasis . . . . .                     | 142 |
| 2.5.1.2   | Klebstoffe auf Caseinbasis . . . . .                       | 144 |
| 2.5.1.3   | Kleben in der Natur . . . . .                              | 144 |
| 2.5.2     | Klebstoffe auf Basis pflanzlicher Naturprodukte . . . . .  | 145 |
| 2.5.3     | Biologisch abbaubare Polymere . . . . .                    | 147 |
| 2.6       | Klebstoffe auf anorganischer Basis . . . . .               | 147 |
| 2.7       | Klebstoffzusätze und haftvermittelnde Substanzen . . . . . | 151 |
| 2.7.1     | Härter . . . . .   | 151 |
| 2.7.2     | Vernetzer . . . . .  | 152 |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 2.7.3    | Beschleuniger und Katalysatoren . . . . .  | 153        |
| 2.7.4    | Weichmacher . . . . .  | 153        |
| 2.7.5    | Harze . . . . .  | 154        |
| 2.7.6    | Wachse . . . . .   | 156        |
| 2.7.7    | Tackifier . . . . .  | 157        |
| 2.7.8    | Füllstoffe . . . . .   | 157        |
| 2.7.9    | Stabilisatoren . . . . .   | 159        |
| 2.7.10   | Antioxidantien . . . . .   | 160        |
| 2.7.11   | Entlüfter und Entschäumer . . . . .  | 160        |
| 2.7.12   | Rheologie – Additive . . . . .   | 160        |
| 2.7.13   | Dispergiermittel . . . . .   | 161        |
| 2.7.14   | Emulgatoren und Schutzkolloide . . . . .   | 161        |
| 2.7.15   | Haftvermittler . . . . .   | 161        |
| 2.7.16   | Primer . . . . .   | 165        |
| 2.7.17   | Lösungsmittel . . . . .  | 166        |
| <b>3</b> | <b>Klebstoffarten . . . . .</b>  | <b>169</b> |
| 3.1      | Reaktionsklebstoffe . . . . .  | 169        |
| 3.1.1    | Reaktionskinetische und physikalische Grundlagen . . . . .                                       | 170        |
| 3.1.1.1  | Einfluss der Zeit . . . . .  | 170        |
| 3.1.1.2  | Einfluss der Temperatur . . . . .  | 172        |
| 3.1.1.3  | Einfluss des Drucks . . . . .  | 175        |
| 3.1.1.4  | Abhängigkeit der Klebschichtdicke vom Anpressdruck . . . . .                                     | 177        |
| 3.1.1.5  | Topfzeit . . . . .   | 178        |
| 3.1.2    | Blockierte Reaktionsklebstoffe . . . . .   | 181        |
| 3.1.2.1  | Chemisch blockierte Reaktionsklebstoffe . . . . .  | 181        |
| 3.1.2.2  | Mechanisch blockierte Reaktionsklebstoffe . . . . .  | 182        |
| 3.1.3    | Kalt- und warmhärtende Reaktionsklebstoffe . . . . .   | 183        |
| 3.1.3.1  | Kalthärtende Reaktionsklebstoffe . . . . .   | 183        |
| 3.1.3.2  | Warmhärtende Reaktionsklebstoffe . . . . .   | 183        |
| 3.1.4    | Lösungsmittelhaltige Reaktionsklebstoffe . . . . .   | 184        |
| 3.2      | Lösungsmittelklebstoffe . . . . .  | 184        |
| 3.3      | Kontaktklebstoffe . . . . .  | 189        |
| 3.4      | Haftklebstoffe . . . . .   | 191        |
| 3.4.1    | Aufbau und Eigenschaften . . . . .   | 191        |
| 3.4.2    | Einteilung der Haftklebstoffe . . . . .  | 192        |
| 3.4.2.1  | Wiederablösbare, repositionierbare Haftklebstoffe . . . . .                                      | 192        |
| 3.4.2.2  | Permanente Haftklebstoffe . . . . .  | 194        |
| 3.4.2.3  | Strukturelle Haftklebstoffe . . . . .  | 194        |
| 3.4.3    | Verarbeitung . . . . .   | 194        |
| 3.4.4    | Anwendungen . . . . .  | 195        |
| 3.4.5    | Prüfung . . . . .  | 195        |
| 3.4.6    | Grundlagen der Haftklebung . . . . .   | 196        |
| 3.4.6.1  | Klebschichtfestigkeit als Folge des strömungsmechanischen Verhaltens von Flüssigkeiten . . . . . | 196        |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 3.4.6.2  | Klebschichtfestigkeit als Folge des Oberflächenspannungs-<br>verhaltens von Flüssigkeiten . . . . . | 198 |
| 3.4.7    | Klebrigkeit (Tack) . . . . .  | 199 |
| 3.5      | Dispersionsklebstoffe . . . . .   | 201 |
| 3.6      | Schmelzklebstoffe . . . . .   | 206 |
| 3.6.1    | Aufbau der Schmelzklebstoffe . . . . .  | 206 |
| 3.6.2    | Charakteristische Merkmale der Schmelzklebstoffe . . . . .  | 208 |
| 3.6.3    | Verarbeitung der Schmelzklebstoffe . . . . .  | 210 |
| 3.6.4    | Eigenschaften der Schmelzklebstoffe . . . . .   | 213 |
| 3.7      | Heißsiegelklebstoffe . . . . .  | 215 |
| 3.8      | Kaschier-, Laminierklebstoffe . . . . .   | 217 |
| 3.9      | Wärmebeständige Klebstoffe . . . . .  | 218 |
| 3.10     | Klebstoffe für Anwendungen bei tiefen Temperaturen . . . . .  | 223 |
| 3.11     | Leitfähige Klebstoffe . . . . .   | 223 |
| 3.11.1   | Elektrisch leitende Klebstoffe . . . . .  | 224 |
| 3.11.1.1 | Isotrop leitende Klebstoffe . . . . .   | 224 |
| 3.11.1.2 | Anisotrop leitende Klebstoffe . . . . .   | 230 |
| 3.11.1.3 | Anisotroper Leitungsmechanismus mit ungefüllten<br>Klebstoffen . . . . .                            | 232 |
| 3.11.1.4 | Elektrisch leitende Polymere . . . . .  | 232 |
| 3.11.2   | Wärmeleitende Klebstoffe . . . . .  | 233 |
| 3.11.3   | Volumeneffekt bei Klebschichten mit Füllstoffen . . . . .   | 234 |
| 3.12     | Klebstoffe mit Nano-Füllstoffen . . . . .   | 235 |
| 3.13     | Mikroverkapselte Klebstoffe . . . . .   | 238 |
| 3.14     | Plastisole . . . . .  | 240 |
| 3.15     | Klebstofffolien . . . . .   | 242 |
| 3.15.1   | Chemisch reagierende Klebstofffolien . . . . .  | 242 |
| 3.15.2   | Physikalisch abbindende Klebstofffolien . . . . .   | 243 |
| 3.16     | Klebebänder . . . . .   | 244 |
| 3.16.1   | Aufbau der Klebebänder . . . . .  | 244 |
| 3.16.2   | Trägermaterialien . . . . .   | 246 |
| 3.16.3   | Trennpapiere . . . . .  | 248 |
| 3.16.4   | Verarbeitung von Klebebändern . . . . .   | 248 |
| 3.16.5   | Anwendungen . . . . .   | 249 |
| 3.16.6   | Prüfung . . . . .   | 249 |
| 3.17     | Klebestreifen . . . . .   | 250 |
| 3.18     | Klebestifte . . . . .   | 251 |
| 3.19     | Dichtstoffe . . . . .   | 252 |
| 3.19.1   | Aufbau der Dichtstoffe . . . . .  | 253 |
| 3.19.2   | Einteilung und Eigenschaften der Dichtstoffe . . . . .  | 255 |
| 3.19.3   | Verarbeitung . . . . .  | 256 |
| 3.20     | Gießharze . . . . .   | 258 |
| 3.21     | Polymermörtel . . . . .   | 260 |
| 3.22     | Strukturkitte und Spachtelmassen . . . . .  | 260 |
| 3.23     | Chemische Befestigungstechnik . . . . .   | 261 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| <b>4</b> | <b>Eigenschaften der Klebschichten</b>   | 263 |
| 4.1      | Allgemeine Betrachtungen   | 263 |
| 4.2      | Schubmodul   | 264 |
| 4.3      | Das Schubspannungs-Gleitungs-Verhalten   | 266 |
| 4.4      | Die thermomechanischen Eigenschaften   | 271 |
| 4.4.1    | Zustandsbereiche   | 271 |
| 4.4.2    | Abhängigkeit des Schubmoduls und des mechanischen<br>Verlustfaktors von der Temperatur | 276 |
| 4.4.3    | Abhängigkeit der Klebfestigkeit von der Temperatur                                     | 278 |
| 4.5      | Elastizitätsmodul  | 280 |
| 4.6      | Kriechen   | 284 |
| 4.7      | Kristallinität   | 291 |
| 4.8      | Klebschichtinhomogenitäten   | 292 |
| 4.9      | Klebschichtmorphologie und strukturabhängiges<br>mechanisches Verhalten                | 293 |
| <b>5</b> | <b>Klebtechnische Eigenschaften der Füge-<br/>teilwerkstoffe</b>                       | 295 |
| 5.1      | Oberflächeneigenschaften   | 295 |
| 5.1.1    | Oberflächenschichten   | 295 |
| 5.1.2    | Molekularer Aufbau und Polarität der Grenz- und<br>Reaktionsschichten                  | 296 |
| 5.1.3    | Oberflächenanalytische Untersuchungsmethoden   | 299 |
| 5.1.3.1  | Elektronen-Spektroskopie zur Chemischen Analyse (ESCA)                                 | 299 |
| 5.1.3.2  | Elektronenstrahl-Mikroanalyse (ESMA)   | 300 |
| 5.1.3.3  | Augerelektronenspektroskopie (AES)   | 300 |
| 5.1.3.4  | Ion-Scattering Spectroscopy (ISS)  | 301 |
| 5.1.3.5  | Sekundärionen Massenspektrometrie (SIMS)   | 301 |
| 5.1.3.6  | Flugzeit-Sekundärionen Massenspektrometrie<br>(TOF-SIMS)                               | 301 |
| 5.1.3.7  | Infrarotspektroskopie mit abgeschwächter<br>Totalreflektion (ATR)                      | 301 |
| 5.1.3.8  | Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Transmissions-<br>elektronenmikroskopie (TEM)    | 302 |
| 5.1.3.9  | Rastertunnelmikroskopie (RTM)  | 302 |
| 5.1.3.10 | Rasterkraft-Mikroskopie, Atomic-Force-Microscopy (AFM)                                 | 303 |
| 5.1.3.11 | Ellipsometrie  | 303 |
| 5.1.4    | Geometrische Struktur  | 304 |
| 5.1.5    | Oberflächenspannung und Benetzungsvermögen   | 308 |
| 5.1.6    | Diffusions- und Lösungsverhalten   | 308 |
| 5.2      | Werkstoffeigenschaften   | 309 |
| 5.2.1    | Festigkeit   | 309 |
| 5.2.2    | Chemischer Aufbau  | 310 |
| 5.2.3    | Wärmeleitfähigkeit   | 311 |
| 5.2.4    | Wärmeausdehnungskoeffizient  | 311 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| <b>6</b> | <b>Bindungskräfte in Klebungen</b>   | 315 |
| 6.1      | Die Natur der Bindungskräfte   | 316 |
| 6.1.1    | Homöopolare Bindung (Atombindung, unpolare Bindung, kovalente Bindung)   | 317 |
| 6.1.2    | Heteropolare Bindung (Ionenbindung, polare Bindung, elektrostatische Bindung)  | 317 |
| 6.1.3    | Metallische Bindung  | 317 |
| 6.1.4    | Zwischenmolekulare Bindungen   | 317 |
| 6.1.4.1  | Dipolkräfte  | 318 |
| 6.1.4.2  | Induktionskräfte   | 320 |
| 6.1.4.3  | Dispersionskräfte  | 320 |
| 6.1.4.4  | Wasserstoffbrückenbindung  | 320 |
| 6.1.5    | Sorption   | 322 |
| 6.2      | Adhäsion   | 324 |
| 6.2.1    | Spezifische Adhäsion   | 325 |
| 6.2.2    | Formschlüssige Verbindung von Klebschicht und Füge-<br>teil (Mechanische Adhäsion)   | 332 |
| 6.3      | Kohäsion   | 333 |
| 6.4      | Benetzung von Oberflächen durch Klebstoffe   | 335 |
| 6.4.1    | Allgemeine Betrachtungen   | 335 |
| 6.4.2    | Thermodynamische Grundlagen  | 336 |
| 6.4.2.1  | Benetzungswinkel   | 336 |
| 6.4.2.2  | Oberflächenspannung  | 337 |
| 6.4.2.3  | Oberflächenenergie   | 339 |
| 6.4.2.4  | Kritische Oberflächenspannung  | 339 |
| 6.4.2.5  | Grenzflächenspannung   | 340 |
| 6.4.2.6  | Adhäsionsarbeit  | 340 |
| 6.4.2.7  | Kohäsionsarbeit  | 341 |
| 6.4.2.8  | Benetzungsgleichgewicht  | 341 |
| 6.4.2.9  | Benetzung als Folge unpolarer und polarer<br>Kraftwirkungen  | 344 |
| 6.4.3    | Zusammenhang zwischen Benetzung<br>und Adhäsionsarbeit   | 345 |
| 6.4.4    | Experimentelle Bestimmung des Benetzungsverhaltens<br>von Oberflächen  | 348 |
| 6.4.4.1  | Randwinkelmessung  | 349 |
| 6.4.4.2  | Messung mittels Testflüssigkeiten  | 350 |
| <b>7</b> | <b>Eigenschaften von Klebungen</b>   | 353 |
| 7.1      | Vorteile und Nachteile von Klebungen   | 353 |
| 7.1.1    | Vorteile von Klebungen   | 355 |
| 7.1.2    | Nachteile von Klebungen  | 359 |
| 7.2      | Eigenspannungen in Klebungen   | 361 |
| 7.2.1    | Eigenspannungen durch unterschiedliche<br>Wärmeausdehnungskoeffizienten von gleichen<br>Füge-<br>teilwerkstoffen und Klebschicht | 361 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 7.2.2    | Eigenspannungen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten von Füge-teilkombinationen und Klebschicht . . . . . | 363        |
| 7.2.3    | Eigenspannungen durch Schwindung der Klebschicht . . . . .  | 366        |
| 7.2.4    | Berechnung der Schwindungsspannungen . . . . .  | 368        |
| 7.2.5    | Maßnahmen zur Reduzierung von Schwindungen . . . . .  | 369        |
| 7.2.5.1  | Klebstoffbedingte Schwindungen . . . . .  | 369        |
| 7.2.5.2  | Fertigungsbedingte Schwindungen . . . . .   | 370        |
| 7.2.6    | Eigenspannungen durch unterschiedliche Temperaturverteilungen . . . . .   | 371        |
| 7.2.7    | Eigenspannungen durch Temperaturwechselbeanspruchung . . . . .  | 371        |
| 7.2.8    | Eigenspannungen durch Alterungsvorgänge der Klebschicht . . . . .   | 372        |
| 7.3      | Bruchverhalten von Klebungen . . . . .  | 372        |
| 7.3.1    | Adhäsionsbruch . . . . .  | 373        |
| 7.3.2    | Kohäsionsbruch . . . . .  | 374        |
| 7.3.3    | Bruchmechanische Betrachtungsweise . . . . .  | 376        |
| 7.4      | Verhalten von Klebungen bei Beanspruchungen durch mechanische Belastungen und Umgebungseinflüsse . . . . .                | 378        |
| 7.4.1    | Allgemeine Betrachtungen . . . . .  | 378        |
| 7.4.2    | Alterung von Klebungen durch Feuchtigkeitseinflüsse . . . . .   | 380        |
| 7.4.2.1  | Feuchtigkeitsdiffusion . . . . .  | 380        |
| 7.4.2.2  | Feuchtigkeitseinflüsse auf die Grenzschicht (bondline corrosion) . . . . .  | 381        |
| 7.4.2.3  | Feuchtigkeitseinflüsse auf die Klebschicht . . . . .  | 383        |
| 7.4.2.4  | Einfluss der Oberflächenvorbehandlung . . . . .   | 384        |
| 7.4.2.5  | Experimentelle Bestimmung der Feuchtigkeitseralterung . . . . .   | 385        |
| 7.4.3    | Korrosion in Klebungen . . . . .  | 388        |
| 7.4.3.1  | Unterwanderungskorrosion . . . . .  | 388        |
| 7.4.3.2  | Spaltkorrosion . . . . .  | 388        |
| 7.4.3.3  | Kontaktkorrosion . . . . .  | 388        |
| 7.4.3.4  | Spannungsrissskorrosion . . . . .   | 389        |
| 7.4.4    | Beanspruchungseinflüsse als Grundlage für die Berechnung von Metallklebungen . . . . .                                    | 389        |
| 7.4.5    | Wirkung energiereicher Strahlen auf Klebschichten . . . . .   | 402        |
| <b>8</b> | <b>Festigkeiten von Metallklebungen . . . . .</b>   | <b>403</b> |
| 8.1      | Allgemeine Betrachtungen . . . . .  | 403        |
| 8.2      | Einflußgrößen auf die Festigkeit von Metallklebungen . . . . .  | 404        |
| 8.3      | Spannungen in Metallklebungen mit dünnen, verformungsarmen Klebschichten . . . . .  | 406        |
| 8.3.1    | Zugspannungen – Zugfestigkeit . . . . .   | 407        |
| 8.3.1.1  | Zugspannungen bei senkrechter und zentrischer (momentenfreier) Belastung . . . . .  | 407        |
| 8.3.1.2  | Spannungen beim Auftreten eines Biegemoments . . . . .  | 409        |
| 8.3.1.3  | Zugspannungen bei exzentrischer Belastung . . . . .   | 409        |



|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 8.3.2   | Schubspannungen – Schubfestigkeit . . . . .   | 412 |
| 8.3.3   | Zugscherspannungen – Klebfestigkeit . . . . .   | 413 |
| 8.3.3.1 | Spannungsverteilung bei unendlich starren Fügeteilen mit elastischer Klebschichtverformung ohne Auftreten eines Biegemoments . . . . .    | 413 |
| 8.3.3.2 | Spannungsverteilung bei elastischen Fügeteilen mit elastischer Klebschichtverformung ohne Auftreten eines Biegemoments . . . . .          | 414 |
| 8.3.3.3 | Spannungsverteilung bei elastischen Fügeteilen mit elastisch-plastischer Klebschichtverformung und Auftreten eines Biegemoments . . . . . | 417 |
| 8.3.3.4 | Klebfestigkeit . . . . .  | 417 |
| 8.3.3.5 | Zusammenhang zwischen Klebfestigkeit und Klebschichtverformung . . . . .  | 421 |
| 8.3.3.6 | Abhängigkeit der Spannungsverteilung von der Temperatur . . . . .   | 423 |
| 8.3.3.7 | Experimentelle Bestimmung der Spannungsverteilung durch Schubspannungs-Gleitungs-Diagramme . . . . .                                      | 424 |
| 8.3.4   | Schälspannungen – Schälwiderstand . . . . .   | 428 |
| 8.4     | Einfluss der geometrischen Gestaltung der Klebfuge auf die Klebfestigkeit einschnittig überlappter Klebungen . . . .                      | 431 |
| 8.4.1   | Überlappungslänge . . . . .   | 431 |
| 8.4.1.1 | Abhängigkeit der übertragbaren Last von der Überlappungslänge . . . . .   | 434 |
| 8.4.1.2 | Abhängigkeit der übertragbaren Last von der Überlappungslänge und der Temperatur . . . . .  | 437 |
| 8.4.2   | Fügeteildicke . . . . .   | 438 |
| 8.4.3   | Gestaltfaktor . . . . .   | 439 |
| 8.4.4   | Überlappungsverhältnis . . . . .  | 440 |
| 8.4.5   | Überlappungsbreite . . . . .  | 441 |
| 8.4.6   | Klebschichtdicke . . . . .  | 442 |
| 8.4.7   | Klebschichtdicke . . . . .  | 442 |
| 8.4.8   | Einfluss der Überlappungslänge, Fügeteildicke und Klebschichtdicke auf das Biegemoment . . . . .  | 446 |
| 8.4.9   | Schäftung . . . . .   | 448 |
| 8.5     | Berechnung der Spannungsverteilung in einschnittig überlappten Klebungen . . . . .  | 449 |
| 8.5.1   | Spannungsverteilung bei Annahme eines linearen Spannungs-Verformungs-Verhaltens der Klebschicht . . . .                                   | 450 |
| 8.5.1.1 | Spannungsverteilung nach Volkersen . . . . .  | 450 |
| 8.5.1.2 | Spannungsverteilung nach Goland und Reissner . . . . .  | 452 |
| 8.5.1.3 | Vergleich der Berechnungsansätze nach Volkersen sowie Goland und Reissner mit experimentellen Ergebnissen . . .                           | 452 |
| 8.5.1.4 | Spannungsverteilung nach Hart-Smith . . . . .   | 454 |
| 8.5.2   | Spannungsverteilung bei Annahme eines nichtlinearen Spannungs-Verformungs-Verhaltens der Klebschicht . . . .                              | 454 |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 8.5.3     | Spannungsverteilung auf der Grundlage theoretischer<br>und experimenteller Ergebnisse . . . . .         | 456        |
| 8.5.3.1   | Verfahren nach Frey . . . . .   | 456        |
| 8.5.3.2   | Verfahren nach Winter und Meckelburg . . . . .  | 457        |
| 8.5.3.3   | Verfahren nach Müller . . . . .   | 457        |
| 8.5.3.4   | Verfahren nach Tombach . . . . .  | 458        |
| 8.5.3.5   | Verfahren nach Eichhorn und Braig . . . . .   | 458        |
| 8.5.3.6   | Verfahren nach Schlegel . . . . .   | 458        |
| 8.5.3.7   | Verfahren nach Cornelius und Stier . . . . .  | 459        |
| 8.5.4     | Berechnung der Spannungsverteilung mit der<br>Finite-Elemente-Methode (FEM) . . . . .                   | 459        |
| 8.6       | Festigkeit bei statischer Langzeitbeanspruchung . . . . .   | 461        |
| 8.7       | Festigkeit bei dynamischer Langzeitbeanspruchung . . . . .  | 464        |
| 8.7.1     | Zugschwellfestigkeit . . . . .  | 465        |
| 8.7.2     | Dauerschwingfestigkeit . . . . .  | 465        |
| 8.8       | Festigkeit bei schlagartiger Beanspruchung . . . . .  | 469        |
| 8.9       | Festigkeit bei Crash-(hochdynamischer-)Beanspruchung . . . . .  | 471        |
| 8.10      | Elastisches Kleben . . . . .  | 472        |
| 8.10.1    | Grundlagen . . . . .  | 472        |
| 8.10.2    | Anwendungen . . . . .   | 477        |
| 8.10.3    | Berechnungsbeispiel . . . . .   | 477        |
| 8.11      | Erhöhung der Festigkeit durch Kombinationsklebungen . . . . .   | 478        |
| 8.12      | Abschließende Bemerkungen zum Festigkeitsverhalten<br>von Metallklebungen . . . . .                     | 480        |
| <b>9</b>  | <b>Berechnung von Metallklebungen . . . . .</b>   | <b>483</b> |
| 9.1       | Allgemeine Betrachtungen . . . . .  | 483        |
| 9.2       | Berechnungsansätze . . . . .  | 484        |
| 9.2.1     | Einfluss der unterschiedlichen Festigkeiten von<br>Fügeteilwerkstoff und Klebschicht . . . . .          | 484        |
| 9.2.2     | Einflussparameter für die Berechnung von Metallklebungen . . . . .                                      | 486        |
| 9.2.3     | Berechnung auf Grundlage der Klebfestigkeit . . . . .   | 487        |
| 9.2.4     | Berechnung auf Grundlage der Volkersen-Gleichung nach<br>Schliekelmann . . . . .                        | 488        |
| 9.2.5     | Abhängigkeit der übertragbaren Last von der<br>Überlappungslänge nach der Volkersen-Gleichung . . . . . | 494        |
| 9.2.6     | Berechnungsbeispiele . . . . .  | 495        |
| 9.2.7     | Berechnung unter Einbeziehung von<br>Abminderungsfaktoren . . . . .                                     | 498        |
| 9.2.8     | Klebnutzungsgrad . . . . .  | 500        |
| 9.2.9     | Ergänzende Betrachtungen zu der Berechnung von<br>Metallklebungen . . . . .                             | 503        |
| <b>10</b> | <b>Kleben runder Klebfugegeometrien . . . . .</b>   | <b>505</b> |
| 10.1      | Kleben rohrförmiger Fügeteile . . . . .   | 506        |
| 10.1.1    | Einfluss der Klebschichtdicke auf die Festigkeit . . . . .  | 506        |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 10.1.2   | Einfluss der Fügeteildicke und der Überlappungslänge auf die Festigkeit . . . . .                            | 507 |
| 10.1.3   | Berechnung der in axialer Richtung übertragbaren Last bei überlappten Rohrklebungen . . . . .                | 508 |
| 10.1.4   | Berechnung der in tangentialer Richtung übertragbaren Last bei überlappten Rohrklebungen . . . . .           | 509 |
| 10.1.5   | Wissensbasiertes System zum Kleben von Rohren . . . . .  | 509 |
| 10.2     | Kleben von Welle-Nabe-Verbindungen . . . . .   | 509 |
| 10.2.1   | Allgemeine Betrachtungen . . . . .   | 509 |
| 10.2.2   | Berechnung von Welle-Nabe-Verbindungen . . . . .   | 510 |
| 10.2.2.1 | Einfluss der Nabenbreite . . . . .   | 511 |
| 10.2.2.2 | Einfluss der Klebschichtdicke und der Rautiefe . . . . .   | 512 |
| 10.2.2.3 | Übertragbares Torsionsmoment . . . . .   | 514 |
| 10.2.2.4 | Berechnungsbeispiel . . . . .  | 516 |
| 10.2.3   | Festlegung von Abminderungsfaktoren . . . . .  | 517 |
| 10.2.4   | Hydrostatisches Hochdruckinjektionskleben . . . . .  | 520 |
| 10.3     | Klebschrumpfen . . . . .   | 521 |
| 10.3.1   | Querpressklebverbindungen . . . . .  | 522 |
| 10.3.2   | Längspressklebverbindungen . . . . .   | 525 |
| 10.4     | Kegelpressverbindungen . . . . .   | 527 |
| 11       | <b>Konstruktive Gestaltung von Metallklebungen</b> . . . . .   | 529 |
| 11.1     | Vorhandensein ausreichender Klebflächen . . . . .  | 529 |
| 11.2     | Vermeidung von Spannungsspitzen . . . . .  | 533 |
| 12       | <b>Technologie des Klebens</b> . . . . .   | 539 |
| 12.1     | Allgemeine Betrachtungen . . . . .   | 539 |
| 12.2     | Oberflächenbehandlung der Fügeteile . . . . .  | 542 |
| 12.2.1   | Oberflächenvorbereitung . . . . .  | 543 |
| 12.2.1.1 | Säubern, Passend machen . . . . .  | 543 |
| 12.2.1.2 | Entfetten . . . . .  | 544 |
| 12.2.2   | Oberflächenvorbehandlung . . . . .   | 547 |
| 12.2.2.1 | Mechanische Oberflächenvorbehandlung . . . . .   | 548 |
| 12.2.2.2 | Kombinierte mechanische-chemisch/thermische Oberflächenvorbehandlung (SACO-, Silicoater-Verfahren) . . . . . | 551 |
| 12.2.2.3 | Physikalische Oberflächenvorbehandlung . . . . .   | 552 |
| 12.2.2.4 | Chemische Oberflächenvorbehandlung . . . . .   | 553 |
| 12.2.2.5 | Elektrochemische Oberflächenvorbehandlung . . . . .  | 554 |
| 12.2.2.6 | Oberflächenvorbehandlung und Grenzschichtausbildung . . . . .  | 555 |
| 12.2.3   | Oberflächennachbehandlung . . . . .  | 555 |
| 12.2.4   | Zusammensetzung der wichtigsten Beizlösungen . . . . .   | 556 |
| 12.3     | Klebstoffverarbeitung . . . . .  | 558 |
| 12.3.1   | Vorbereitung der Klebstoffe . . . . .  | 558 |
| 12.3.1.1 | Viskosität der Klebstoffe . . . . .  | 560 |
| 12.3.1.2 | Thixotropie der Klebstoffe . . . . .   | 562 |
| 12.3.1.3 | Rheologie . . . . .  | 562 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 12.3.2   | Mischen der Klebstoffe . . . . .  | 563        |
| 12.3.2.1 | Statische Mischer . . . . .   | 564        |
| 12.3.2.2 | Dynamische Mischer . . . . .  | 566        |
| 12.3.3   | Dosieren und Auftragen der Klebstoffe . . . . .   | 566        |
| 12.3.3.1 | Dosiersysteme . . . . .   | 567        |
| 12.3.3.2 | Auftragssysteme . . . . .   | 571        |
| 12.3.3.3 | Kaschieren, Laminieren . . . . .  | 575        |
| 12.3.3.4 | Etikettieren . . . . .  | 577        |
| 12.3.3.5 | Beflocken . . . . .   | 578        |
| 12.3.4   | Abbinden der Klebstoffe . . . . .   | 578        |
| 12.3.5   | Verfahren zum Abbinden der Klebstoffe . . . . .   | 583        |
| 12.4     | Herstellung von Klebungen . . . . .   | 588        |
| 12.4.1   | Kleben als Fertigungssystem . . . . .   | 588        |
| 12.4.1.1 | Allgemeine Betrachtungen . . . . .  | 588        |
| 12.4.1.2 | Klebtechnische Ausbildung . . . . .   | 589        |
| 12.4.2   | Auswahl von Klebstoffen . . . . .   | 590        |
| 12.4.2.1 | Auswahl von Klebstoffen unter anwendungsspezifischen Gesichtspunkten . . . . .  | 590        |
| 12.4.2.2 | Rechnergestützte Klebstoffauswahl . . . . .   | 594        |
| 12.4.2.3 | Kenndaten des Klebvorgangs . . . . .  | 596        |
| 12.4.3   | Fehlermöglichkeiten beim Kleben und Abhilfemaßnahmen . . . . .  | 596        |
| 12.4.4   | Klebtechnische Schadensfälle . . . . .  | 599        |
| 12.5     | Sicherheits- und Umweltschutzmaßnahmen bei der Verarbeitung von Klebstoffen . . . . .   | 600        |
| 12.6     | Klassifizierung wichtiger Klebstoffarten nach arbeitsphysiologischen und verarbeitungstechnologischen Gesichtspunkten . . . . . | 606        |
| 12.7     | Kombinierte (Hybrid-)Fügeverfahren . . . . .  | 606        |
| 12.7.1   | Allgemeine Betrachtungen . . . . .  | 606        |
| 12.7.2   | Punktschweißen – Kleben . . . . .   | 609        |
| 12.7.2.1 | Verfahrensdurchführung . . . . .  | 609        |
| 12.7.2.2 | Einfluss der Fügeanteilwerkstoffe . . . . .   | 609        |
| 12.7.2.3 | Mechanisches Verhalten von Punktschweißklebungen . . . . .  | 610        |
| 12.7.3   | Nieten/Schrauben – Kleben . . . . .   | 612        |
| 12.7.4   | Stanznieten – Kleben . . . . .  | 613        |
| 12.7.5   | Durchsetzfügen – Kleben . . . . .   | 614        |
| 12.7.6   | Falzen – Kleben . . . . .   | 616        |
| 12.7.7   | Schrumpfen – Kleben . . . . .   | 617        |
| 12.8     | Kleben beölter Bleche . . . . .   | 617        |
| 12.9     | Kleben in feuchter Atmosphäre (Unterwasserkleben) . . . . .   | 619        |
| 12.10    | Demontage von Klebungen („Entkleben“) . . . . .   | 620        |
| 13       | <b>Kleben metallischer Werkstoffe . . . . .</b>   | <b>625</b> |
| 13.1     | Allgemeine Betrachtungen . . . . .  | 625        |
| 13.2     | Klebbbarkeit wichtiger Metalle . . . . .  | 626        |
| 13.2.1   | Aluminium und Aluminiumlegierungen . . . . .  | 626        |

|           |   |         |
|-----------|---|---------|
| 13.2.2    | Beryllium . . . . .   | 630     |
| 13.2.3    | Blei . . . . .  | 631     |
| 13.2.4    | Chrom, verchromte Werkstoffe . . . . .  | 631     |
| 13.2.5    | Edelmetalle . . . . .   | 631     |
| 13.2.6    | Kupfer . . . . .  | 632     |
| 13.2.7    | Magnesium . . . . .   | 633     |
| 13.2.8    | Messing . . . . .   | 633     |
| 13.2.9    | Nichtrostende Stähle, Edelstähle . . . . .  | 634     |
| 13.2.10   | Nickel, vernickelte Werkstoffe . . . . .  | 635     |
| 13.2.11   | Stähle, allgemeine Baustähle . . . . .  | 635     |
| 13.2.12   | Titan . . . . .   | 636     |
| 13.2.13   | Verzinkte Stähle, Zink . . . . .  | 638     |
| 13.3      | Kleben von Metallkombinationen . . . . .  | 640     |
| 13.4      | Kleben von Blechen mit organischen und anorganischen<br>Beschichtungen . . . . .          | 642     |
| <br>14    | <br><b>Kleben der Kunststoffe und weiterer nichtmetallischer<br/>Werkstoffe . . . . .</b> | <br>645 |
| 14.1      | Kleben der Kunststoffe . . . . .  | 645     |
| 14.1.1    | Grundlagen . . . . .  | 645     |
| 14.1.2    | Mechanische Oberflächenvorbehandlung . . . . .  | 652     |
| 14.1.2.1  | Reinigen der Oberfläche . . . . .   | 652     |
| 14.1.2.2  | Aufrauen der Oberfläche . . . . .   | 653     |
| 14.1.3    | Chemische Oberflächenvorbehandlung . . . . .  | 654     |
| 14.1.3.1  | Beizlösungen . . . . .  | 654     |
| 14.1.3.2  | Gasphasenfluorierung . . . . .  | 655     |
| 14.1.3.3  | Sulfonierung . . . . .  | 656     |
| 14.1.3.4  | Ozonisierung . . . . .  | 657     |
| 14.1.4    | Physikalische Oberflächenvorbehandlung . . . . .  | 657     |
| 14.1.4.1  | Grundlagen der Plasma-Verfahren . . . . .   | 657     |
| 14.1.4.2  | Niederdruckplasma-Vorbehandlung . . . . .   | 659     |
| 14.1.4.3  | Atmosphärendruck – Plasma . . . . .   | 663     |
| 14.1.4.4  | Oberflächenreinigung mittels Plasma . . . . .   | 665     |
| 14.1.4.5  | Plasmapolymerisation . . . . .  | 665     |
| 14.1.4.6  | Vorbehandlung mittels Corona-Entladung . . . . .  | 666     |
| 14.1.4.7  | Beflammen . . . . .   | 672     |
| 14.1.4.8  | Laser-Vorbehandlung . . . . .   | 674     |
| 14.1.4.9  | Ionenätzen, Sputtern . . . . .  | 677     |
| 14.1.4.10 | Nachweis reaktiver Gruppen an vorbehandelten<br>Oberflächen . . . . .                     | 678     |
| 14.1.5    | Klebstoffe für Kunststoffe . . . . .  | 678     |
| 14.1.5.1  | Lösungsmittelklebstoffe . . . . .   | 679     |
| 14.1.5.2  | Diffusionsklebung . . . . .   | 679     |
| 14.1.5.3  | Reaktionsklebstoffe . . . . .   | 681     |
| 14.1.5.4  | Schmelzklebstoffe . . . . .   | 682     |
| 14.1.6    | Klebbbarkeit von Kunststoffen . . . . .   | 682     |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| 14.1.6.1    | Thermoplastische Kunststoffe, in organischen Lösungsmitteln löslich bzw. quellbar . . . . . | 683 |
| 14.1.6.1.1  | Polyvinylchlorid (PVC) . . . . .  | 683 |
| 14.1.6.1.2  | Polystyrol (PS) . . . . .   | 684 |
| 14.1.6.1.3  | Polymethylmethacrylat, Acrylglas (PMMA) . . . . .   | 684 |
| 14.1.6.1.4  | Polycarbonat (PC) . . . . .   | 685 |
| 14.1.6.1.5  | Celluloseacetat, Acetylcellulose (CA) . . . . .   | 686 |
| 14.1.6.1.6  | Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere (ABS) . . . . .                                      | 686 |
| 14.1.6.2    | Thermoplastische Kunststoffe, in organischen Lösungsmitteln unlöslich . . . . .             | 686 |
| 14.1.6.2.1  | Polyethylen (PE) . . . . .  | 686 |
| 14.1.6.2.2  | Polypropylen (PP) . . . . .   | 687 |
| 14.1.6.2.3  | Polytetrafluorethylen, Teflon (PTFE) . . . . .  | 689 |
| 14.1.6.2.4  | Polyamide (PA) . . . . .  | 690 |
| 14.1.6.2.5  | Polyethylenterephthalat, Polyester (PET, SP) . . . . .                                      | 690 |
| 14.1.6.2.6  | Polyimide (PI) . . . . .  | 690 |
| 14.1.6.2.7  | Polyamidimide . . . . .   | 691 |
| 14.1.6.2.8  | Polyoxymethylen, Polyacetale (POM) . . . . .  | 691 |
| 14.1.6.2.9  | Polyetherketone (PEK) . . . . .   | 691 |
| 14.1.6.2.10 | Polyetherimide (PEI) . . . . .  | 692 |
| 14.1.6.2.11 | Polysulfone (PSU) . . . . .   | 692 |
| 14.1.6.2.12 | Polyphenylenether (PPE), Polyphenylenoxid (PPO) . . . . .                                   | 692 |
| 14.1.6.2.13 | Polyphenylensulfide, Polyarylsulfide (PPS) . . . . .  | 693 |
| 14.1.6.2.14 | Polyvinylidenfluoride (PVDF, PVF <sub>2</sub> ) . . . . .                                   | 693 |
| 14.1.6.2.15 | Polyphenylchinoxalin (PCO) . . . . .  | 693 |
| 14.1.6.3    | Duromere Kunststoffe, in organischen Lösungsmitteln unlöslich . . . . .                     | 694 |
| 14.1.6.3.1  | Epoxidharz-Kunststoffe (EP) . . . . .   | 694 |
| 14.1.6.3.2  | Formaldehydcondensate . . . . .   | 694 |
| 14.1.6.3.3  | Polyurethanschaum . . . . .   | 694 |
| 14.1.6.3.4  | Silicon-Kautschuk . . . . .   | 695 |
| 14.1.6.3.5  | Flüssigkristalline Polymere (liquid crystal polymer, LCP) . . . . .                         | 695 |
| 14.1.6.4    | Faserverstärkte Kunststoffe . . . . .   | 695 |
| 14.1.6.4.1  | Oberflächenvorbehandlung . . . . .  | 697 |
| 14.1.6.4.2  | SMC/BMC-Formmassen . . . . .  | 699 |
| 14.1.7      | Festigkeit und konstruktive Gestaltung von Kunststoffklebungen . . . . .                    | 700 |
| 14.1.8      | Kleben von Kunststoffen mit Metallen . . . . .  | 703 |
| 14.1.8.1    | Spannungen in Kunststoff-Metall-Klebungen . . . . .   | 703 |
| 14.1.8.2    | Konstruktive Gestaltung von Kunststoff-Metall-Klebungen . . . . .                           | 707 |
| 14.1.8.3    | Klebstoffe für Kunststoff-Metall-Klebungen . . . . .  | 708 |
| 14.1.8.4    | Prüfung von Kunststoff- und Kunststoff-Metall-Klebungen . . . . .                           | 709 |
| 14.2        | Kleben von Glas . . . . .   | 710 |
| 14.2.1      | Klebtechnische Eigenschaften der Gläser . . . . .   | 710 |
| 14.2.2      | Oberflächenbehandlung . . . . .   | 713 |
| 14.2.3      | Klebstoffe und Primer . . . . .   | 714 |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 14.2.4    | Strahlungshärtung . . . . .   | 714        |
| 14.2.5    | Glasklebung am Bau (Structural Glazing) . . . . .   | 716        |
| 14.2.6    | Glasklebung im Fahrzeugbau (Direct Glazing) . . . . .                                       | 717        |
| 14.2.7    | Kleben von optischen Bauteilen . . . . .  | 717        |
| 14.2.8    | Glas-Metall- und Glas-Kunststoff-Klebung . . . . .  | 718        |
| 14.3      | Kleben von Keramik . . . . .  | 719        |
| 14.4      | Kleben von Gummi . . . . .  | 720        |
| 14.4.1    | Allgemeine Betrachtungen . . . . .  | 720        |
| 14.4.2    | Kleben von vulkanisiertem Gummi<br>(Gummi-Gummi-Klebung) . . . . .                          | 721        |
| 14.4.2.1  | Oberflächenvorbehandlung . . . . .  | 721        |
| 14.4.2.2  | Klebstoffe . . . . .  | 722        |
| 14.4.2.3  | Bindung unvulkanisierter Kautschuke . . . . .   | 723        |
| 14.4.2.4  | Ethylen/Propylen-Dien-Terpolymerisate (EPDM) . . . . .                                      | 723        |
| 14.4.2.5  | Gummi-Reparaturklebungen . . . . .  | 725        |
| 14.4.3    | Gummi-Metall-Bindung . . . . .  | 725        |
| 14.4.3.1  | Vernetzung mittels Resorzin-Formaldehyd . . . . .   | 726        |
| 14.4.3.2  | Vernetzung durch Polyisocyanate . . . . .   | 727        |
| 14.4.4    | Gummi-Glas-Klebung . . . . .  | 728        |
| 14.4.5    | Behälterauskleidungen . . . . .   | 728        |
| 14.5      | Kleben von Holz . . . . .   | 729        |
| 14.5.1    | Allgemeine Betrachtungen . . . . .  | 729        |
| 14.5.2    | Klebtechnische Eigenschaften von Holz . . . . .   | 729        |
| 14.5.3    | Klebstoffe . . . . .  | 730        |
| 14.5.4    | Anforderungen an Holzklebungen . . . . .  | 734        |
| 14.5.5    | Herstellung von Holzklebungen . . . . .   | 735        |
| 14.5.6    | Qualifizierung . . . . .  | 735        |
| 14.6      | Kleben poröser Werkstoffe . . . . .   | 736        |
| <b>15</b> | <b>Industrielle Anwendungen des Klebens . . . . .</b>                                       | <b>739</b> |
| 15.1      | Allgemeine Betrachtungen . . . . .  | 739        |
| 15.2      | Kleben in der Luft- und Raumfahrt . . . . .   | 739        |
| 15.2.1    | Technologische Hintergründe . . . . .   | 739        |
| 15.2.2    | Geschichtliche Entwicklung . . . . .  | 741        |
| 15.2.3    | Typische Anwendungen . . . . .  | 742        |
| 15.2.4    | Klebstoffe . . . . .  | 743        |
| 15.3      | Kleben im Fahrzeugbau . . . . .   | 745        |
| 15.3.1    | Allgemeine Betrachtungen . . . . .  | 745        |
| 15.3.2    | Klebtechnische Anwendungen . . . . .  | 745        |
| 15.3.3    | Klebstoffe . . . . .  | 751        |
| 15.3.4    | Berechnungsbeispiel für die Klebschicht-Dimensionierung<br>einer Bus-Frontscheibe . . . . . | 753        |
| 15.4      | Kleben im Maschinenbau . . . . .  | 754        |
| 15.5      | Kleben in der Elektronik . . . . .  | 756        |
| 15.5.1    | Anwendungen . . . . .   | 758        |
| 15.5.2    | Klebstoffverarbeitung . . . . .   | 759        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 15.5.3    | Mikroverbindungstechnik . . . . .  | 761        |
| 15.6      | Kleben in der Papierverarbeitung . . . . .   | 762        |
| 15.6.1    | Klebstoffe . . . . .   | 762        |
| 15.6.2    | Kleben von gebundenen Erzeugnissen . . . . .   | 763        |
| 15.6.3    | Einfluss der Klebstoffe auf das Papierrecycling . . . . .  | 763        |
| 15.6.4    | Weitere Anwendungen . . . . .  | 764        |
| 15.7      | Kleben in der Verpackungsindustrie . . . . .   | 765        |
| 15.8      | Kleben in der Schuh- und Lederindustrie . . . . .  | 766        |
| 15.8.1    | Klebstoffe und Klebstoffverarbeitung . . . . .   | 766        |
| 15.8.2    | Oberflächenbehandlung . . . . .  | 767        |
| 15.9      | Kleben und Dichten in der Bauindustrie . . . . .   | 767        |
| 15.10     | Kleben in der Medizin . . . . .  | 768        |
| 15.10.1   | Gewebeklebung . . . . .  | 768        |
| 15.10.2   | Haftklebstoffe, Klebebänder . . . . .  | 769        |
| 15.10.3   | Transdermale therapeutische Systeme . . . . .  | 770        |
| 15.10.4   | Zahnbehandlung . . . . .   | 770        |
| 15.10.5   | Kleben medizinischer Geräte . . . . .  | 771        |
| 15.11     | Anwendungen des Klebens bei Reparaturen . . . . .  | 772        |
| 15.11.1   | Metallische Werkstoffe . . . . .   | 772        |
| 15.11.2   | Kunststoffe . . . . .  | 774        |
| 15.11.2.1 | Starre Werkstoffe . . . . .  | 774        |
| 15.11.2.2 | PVC-Folien . . . . .   | 775        |
| 15.11.2.3 | Gummierte Fasergewebe . . . . .  | 775        |
| 15.11.3   | Porzellan . . . . .  | 775        |
| 15.11.4   | Holz . . . . .   | 776        |
| 15.12     | Literatur zu weiteren Anwendungen . . . . .  | 776        |
| <b>16</b> | <b>Prüfung und Qualitätssicherung von Klebstoffen<br/>und Klebungen . . . . .</b>  | <b>777</b> |
| 16.1      | Allgemeine Betrachtungen . . . . .   | 777        |
| 16.1.1    | Qualitätsmanagement in der Klebtechnik . . . . .   | 778        |
| 16.1.2    | Einzelmaßnahmen für ein Qualitätssicherungskonzept<br>„Fertigungssystem Kleben“ . . . . .  | 779        |
| 16.2      | Zerstörende Prüfverfahren . . . . .  | 780        |
| 16.2.1    | Prüfverfahren für statische Kurzzeitbeanspruchungen . . .  | 781        |
| 16.2.1.1  | Beanspruchung auf Zugscherung . . . . .  | 781        |
| 16.2.1.2  | Beanspruchung auf Schub (Schubspannungs-Gleitungs-<br>Verhalten, Verdreherschfestigkeit) . . . . .   | 783        |
| 16.2.1.3  | Beanspruchung auf Zug (Zugfestigkeit) . . . . .  | 784        |
| 16.2.1.4  | Beanspruchung auf Druckscherung (Druckscherfestigkeit)   | 785        |
| 16.2.1.5  | Beanspruchung auf Torsion (Torsionsscherfestigkeit,<br>Losbrechmoment) . . . . .   | 785        |
| 16.2.1.6  | Beanspruchung auf Schälung (Winkelschälversuch,<br>Nass-Schäl-Test, Rollenschälversuch, Klettertrommel-<br>schälversuch, Folienschälversuch) . . . . . | 786        |
| 16.2.1.7  | Beanspruchung auf Spaltung (Biegeschälversuch, Keiltest)   | 789        |



|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 16.2.2   | Prüfverfahren für statische und dynamische<br>Langzeitbeanspruchungen . . . . .             | 793 |
| 16.2.2.1 | Prüfung der Zeitstandfestigkeit . . . . .   | 793 |
| 16.2.2.2 | Prüfung der Dauerschwingfestigkeit . . . . .  | 794 |
| 16.2.3   | Prüfung bei schlagartiger Beanspruchung . . . . .   | 794 |
| 16.2.4   | Prüfverfahren für Langzeitbeanspruchung unter<br>Alterungseinflüssen . . . . .              | 795 |
| 16.2.4.1 | Allgemeine Betrachtungen . . . . .  | 795 |
| 16.2.4.2 | Abkürzungsverfahren für Langzeitbeanspruchungen . . .                                       | 796 |
| 16.2.5   | Prüfung mittels Schallemissionsanalyse . . . . .  | 800 |
| 16.3     | Zerstörungsfreie Prüfverfahren . . . . .  | 801 |
| 16.3.1   | Verfahren auf Basis mechanischer Vibration (Ultraschall) .                                  | 802 |
| 16.3.1.1 | Resonanzverfahren . . . . .   | 803 |
| 16.3.1.2 | Impuls-Echo-Verfahren . . . . .   | 803 |
| 16.3.1.3 | Spektralanalyse mit niedrigen Prüffrequenzen . . . . .                                      | 804 |
| 16.3.1.4 | Impact-Resonanz-Methode . . . . .   | 804 |
| 16.3.2   | Elektrische Verfahren . . . . .   | 805 |
| 16.3.3   | Thermische Verfahren . . . . .  | 805 |
| 16.3.3.1 | Optisch angeregte Lockin-Thermographie . . . . .  | 805 |
| 16.3.3.2 | Ultraschall angeregte Lockin-Thermographie . . . . .  | 806 |
| 16.3.4   | Strahlungsverfahren . . . . .   | 806 |
| 16.3.4.1 | Röntgenstrahlung . . . . .  | 806 |
| 16.3.4.2 | Neutronenradiographie . . . . .   | 807 |
| 16.3.5   | Holographische Verfahren . . . . .  | 807 |
| 16.4     | Prüfung von Polymereigenschaften<br>und Härtungsreaktionen . . . . .                        | 807 |
| 16.4.1   | Dynamisch-Mechanische-Thermoanalyse (DMTA)<br>Dynamisch-Mechanische-Analyse (DMA) . . . . . | 808 |
| 16.4.2   | Differenzial-Thermo-Analyse (DTA) . . . . .   | 812 |
|          | Dynamische-Differenz-Kalorimetrie (DDK) . . . . .   | 812 |
|          | Differenzial-Scanning-Calorimetrie (DSC) . . . . .  | 812 |
| 16.4.3   | Torsionsschwingungsversuch . . . . .  | 813 |
| 16.4.4   | Dielektrische Analyse (DEA) . . . . .   | 813 |
|          | Dielektrische-Thermoanalyse (DETA) . . . . .  | 813 |
| 16.4.5   | Thermogravimetrische Analyse (TGA) . . . . .  | 814 |
|          | Thermogravimetrie (TG) . . . . .  | 814 |
| 16.4.6   | Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit . . . . .   | 814 |
| 16.4.7   | Thermomechanische Analyse, Dilatometrie (TMA) . . . .                                       | 815 |
| 16.4.8   | Mikrothermische Analyse ( $\mu$ TA) . . . . .   | 815 |
| 16.4.9   | Infrarot-(IR)-Spektroskopie . . . . .   | 815 |
| 16.4.10  | Kern-(Spin-)Resonanz-Spektroskopie<br>(Nuclear-Magnetic-Resonance NMR) . . . . .            | 817 |
| 16.4.11  | Chromatographie . . . . .   | 818 |
| 16.4.12  | Weitere in der Literatur beschriebene Methoden . . . . .                                    | 819 |

|           |  |      |
|-----------|--|------|
| <b>17</b> | <b>Anhang</b> . . . . .  | 821  |
| 17.1      | Verzeichnis von Normen, Standards, Richtlinien und<br>Merkblätter zum Kleben und zu verwandten Gebieten .        | 821  |
| 17.1.1    | Allgemeine Normen . . . . .  | 822  |
| 17.1.2    | Definitionen und Prüfungen von Klebstoffen;<br>Klebstoffverarbeitung . . . . .                                   | 822  |
| 17.1.3    | Prüfung von Metallklebungen . . . . .  | 823  |
| 17.1.4    | Kunststoffe . . . . .  | 825  |
| 17.1.4.1  | Kurzbezeichnungen, Einteilung . . . . .  | 825  |
| 17.1.4.2  | Prüfung mechanischer und physikalischer Eigenschaften .  | 826  |
| 17.1.4.3  | Kleben von Kunststoffen und Kunststoff-Metall-<br>Klebungen . . . . .  | 826  |
| 17.1.4.4  | Prüfung von Polymereigenschaften . . . . .   | 827  |
| 17.1.4.5  | Faserverstärkte Kunststoffe . . . . .  | 827  |
| 17.1.5    | Gummi, Elastomere . . . . .  | 827  |
| 17.1.6    | Oberflächenbehandlung und -prüfung . . . . .   | 828  |
| 17.1.7    | Alterungs- und Klimaprüfungen . . . . .  | 828  |
| 17.1.8    | Dichtstoffe . . . . .  | 829  |
| 17.1.9    | Klebebänder . . . . .  | 830  |
| 17.1.10   | Schmelzklebstoffe . . . . .  | 830  |
| 17.1.11   | Kleben von Holz . . . . .  | 830  |
| 17.1.12   | Kleben von Leder- und Schuhwerkstoffen . . . . .   | 831  |
| 17.1.13   | Kleben in der Papierverarbeitung . . . . .   | 831  |
| 17.1.14   | Kleben in der Bauindustrie . . . . .   | 832  |
| 17.1.15   | Prüfung von Oberflächen und Materialeigenschaften . .  | 833  |
| 17.1.16   | Definitionen und Messungen mechanischer, physikalischer<br>und thermodynamischer Größen . . . . .                | 833  |
| 17.2      | Verzeichnis ausgewählter ASTM-Methoden für die<br>Prüfung von Klebstoffen und Klebungen . . . . .                | 834  |
| 17.3      | Kurzzeichen für Klebstoffgrundstoffe und Kunststoffe . .   | 837  |
| 17.4      | Ausgewählte Umrechnungsfaktoren angelsächsischer Ein-<br>heiten und SI-Einheiten für klebtechnische Berechnungen | 840  |
| 17.5      | Ausgewählte deutsch-englische und englisch-deutsche<br>Begriffe aus dem Gebiet des Klebens . . . . .             | 841  |
| <b>18</b> | <b>Literatur</b> . . . . .   | 863  |
|           | Veröffentlichungen aus nationalen und internationalen<br>Fachzeitschriften . . . . .                             | 863  |
|           | Bücher aus dem deutschen Sprachraum . . . . .  | 1043 |
|           | Bücher aus dem angelsächsischen Sprachraum . . . . .   | 1044 |
| <b>19</b> | <b>Sachverzeichnis</b> . . . . .   | 1047 |



<http://www.springer.com/978-3-540-85264-3>

Kleben

Grundlagen, Technologien, Anwendungen

Habenicht, G.

2009, XXXII, 1104 S., Hardcover

ISBN: 978-3-540-85264-3