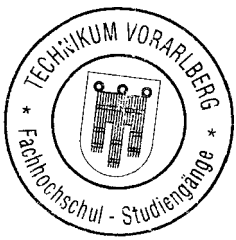
Gerd Habenicht

dandelon.com
© 2008 AGI-Information Management Consultants
May be used for personal purposes only or by
libraries associated to dandelon.com network.

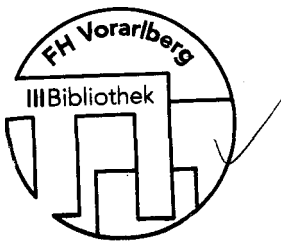
Kleben

Grundlagen, Technologie, Anwendungen

Dritte, völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage
mit 243 Abbildungen und 37 Tabellen



Springer



Verzeichnis der Formelzeichen XXI

Einleitung **1**

1 Einteilung und Aufbau der Klebstoffe 5
1.1 Begriffe und Definitionen 5
1.2 Einteilung der Klebstoffe 6
1.2.1 Einteilung nach der chemischen Basis 6
1.2.2 Einteilung nach dem Abbindemechanismus 7
1.3 Aufbau der Klebstoffe 9
1.3.1 Chemischer Aufbau der Monomere 10
1.3.2 Aufbau der Polymere 12
1.3.2.1 Reaktionsmechanismen zur Polymerbildung 12
1.3.2.2 Struktur der Polymere 13

2 Klebstoffgrundstoffe 17
2.1 Polymerisationsklebstoffe 17
2.1.1 Einkomponenten-Polymerisationsklebstoffe 19
2.1.1.1 Cyanacrylatklebstoffe 19
2.1.1.2 Anaerobe Klebstoffe (Diacrylsäureester) 24
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 Photoinitiatoren 39
2.1.1.3.8 Photosensibilisatoren 41
2.1.1.3.9 Kationische Strahlungshärtung 41
2.1.1.3.10 Lichthärtung 42
2.1.1.3.11 Kombinationshärtung 43
2.1.1.3.12 Elektronenstrahlhärtung 43
2.1.1.3.13 Laserstrahlhärtung 46
2.1.1.3.14 Anwendungen 46

2.1.1.4 Aerobe Klebstoffe . . . 47
2.1.2 Zweikomponenten-Polymerisationsklebstoffe . . . 48
2.1.2.1 Methacrylatklebstoffe . . . 48
2.1.2.2 Verarbeitungssysteme der Methylmethacrylatklebstoffe . . . 50
2.1.3 Polymere Grundstoffe . . . 53
2.1.3.1 Polyvinylacetat (PVAC) . . . 54
2.1.3.2 Polyvinylalkohol (PVAL) . . . 55
2.1.3.3 Polyvinylether . . . 55
2.1.3.4 Ethylen-Vinylacetat (EVA) . . . 56
2.1.3.5 Ethylen-Acrylsäure-Copolymere . . . 57
2.1.3.6 Polyvinylacetale . . . 57
2.1.3.7 Polystyrol (PS) . . . 58
2.1.3.8 Polyvinylchlorid (PVC) . . . 59
2.1.3.9 Polyvinylidenchlorid (PVDC) . . . 59
2.1.4 Kautschukpolymere . . . 60
2.1.4.1 Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR) . . . 60
2.1.4.2 Styrol-Blockpolymere . . . 61
2.1.4.3 Chloroprenkautschuk (CR) . . . 64
2.1.4.4 Nitrilkautschuk (NBR) . . . 65
2.1.4.5 Butylkautschuk (IIR) . . . 66
2.1.4.6 Polybutene . . . 66
2.1.5 Sonstige Thermoplaste . . . 67
2.1.5.1 Polyethylen (PE) . . . 67
2.1.5.2 Polypropylen (PP) . . . 68
2.1.5.3 Fluorierte Kohlenwasserstoffe (Fluorthermoplaste) . . . 69
2.2 Polyadditionsklebstoffe . . . 71
2.2.1 Epoxidharzklebstoffe (EP) . . . 71
2.2.1.1 Aufbau der Epoxidharze . . . 71
2.2.1.2 Vernetzungsreaktionen der Epoxidharze . . . 74
2.2.1.3 Kalthärtende Epoxidharzklebstoffe . . . 80
2.2.1.4 Warmhärtende Epoxidharzklebstoffe . . . 81
2.2.1.5 Zweikomponenten-Epoxidharzklebstoffe . . . 81
2.2.1.6 Lösungsmittelhaltige Epoxidharzklebstoffe . . . 82
2.2.1.7 Zähharte („toughened") Epoxidharzklebstoffe . . . 82
2.2.1.8 Reaktive Epoxidharzschmelzklebstoffe . . . 87
2.2.1.9 Pulverförmige Epoxidharzklebstoffe . . . 89
2.2.2 Polyurethanklebstoffe (PUR) . . . 89
2.2.2.1 Einkomponenten-Polyurethanklebstoffe . . . 93
2.2.2.2 Zweikomponenten-Polyurethanklebstoffe . . . 94
2.2.2.3 Polyurethandispersionen . . . 94
2.2.2.3.1 Emulgatorhaltige Dispersionen . . . 95
2.2.2.3.2 Emulgatorfreie Dispersionen . . . 95
2.2.2.4 Lösungsmittelhaltige Polyurethanklebstoffe . . . 97
2.2.2.5 Reaktive Polyurethan-Schmelzklebstoffe . . . 98
2.2.2.6 Thermisch aktivierbare Polyurethanklebstoffe . . . 99
2.2.2.7 Radikalisch vernetzende Polyurethanklebstoffe . . . 100

2.2.3 Polycyanurate . . . 102
2.3 Polykondensationsklebstoffe . . . 102
2.3.1 Formaldehydkondensate . . . 103
2.3.1.1 Phenol-Formaldehydharz-Klebstoffe (PF) . . . 103
2.3.1.2 KresoWResorzin-Formaldehydharz-Klebstoffe . . . 106
2.3.1.3 Harnstoff-Formaldehydharz-Klebstoffe (UF) . . . 106
2.3.1.4 Melamin-Formaldehydharz-Klebstoffe . . . 108
2.3.1.5 Formaldehydemissionen . . . 109
2.3.2 Polyamide (PA) . . . 109
2.3.3 Polyester . . . 112
2.3.3.1 Gesättigte Polyester und Copolyester . . . 112
2.3.3.2 Ungesättigte Polyester . . . 115
2.3.4 Silicone . . . 116
2.3.4.1 Einkomponenten-RTV-Systeme . . . 117
2.3.4.2 Zweikomponenten-RTV-Systeme . . . 119
2.3.4.3 Silicon-Trennmittel . . . 121
2.3.4.4 Silanmodifizierte Polymere (SMP) . . . 123
2.3.5 Polyimide (PI) . . . 124
2.3.6 Polybenzimidazole . . . 126
2.3.7 Polysulfone . . . 127
2.3.8 Polysulfide . . . 128
2.4 Zusammenfassende Darstellung der Polyreaktionen . . . 129
2.5 Klebstoffe auf natürliche Basis . . . 133
2.5.1 Klebstoffe auf Basis tierischer Naturprodukte . . . 134
2.5.1.1 Klebstoffe auf Glutinbasis . . . 134
2.5.1.2 Klebstoffe auf Caseinbasis . . . 135
2.5.1.3 Kleben in der Natur . . . 135
2.5.2 Klebstoffe auf Basis pflanzlicher Naturprodukte . . . 136
2.6 Klebstoffe auf anorganischer Basis . . . 137
2.7 Klebstoffzusätze und haftvermittelnde Substanzen . . . 141
2.7.1 Härter . . . 141
2.7.2 Vernetzer . . . 142
2.7.3 Beschleuniger und Katalysatoren . . . 143
2.7.4 Weichmacher . . . 143
2.7.5 Harze . . . 144
2.7.6 Wachse . . . 146
2.7.7 Füllstoffe . . . 146
2.7.8 Stabilisatoren . . . 149
2.7.9 Haftvermittler . . . 149
2.7.10 Primer . . . 153
2.7.11 Lösungsmittel . . . 154

3 Klebstoffarten . . . 157
3.1 Reaktionsklebstoffe . . . 157
3.1.1 Reaktionskinetische und physikalische Grundlagen . . . 158
3.1.1.1 Einfluß der Zeit . . . 158

3.1.1.2 Einfluß der Temperatur . . . 160
3.1.1.3 Einfluß des Drucks . . . 162
3.1.1.4 Abhängigkeit der Klebschichtdicke vom Anpreßdruck . . 165
3.1.1.5 Topfzeit . . . 166
3.1.2 Blockierte Reaktionsklebstoffe . . . 169
3.1.2.1 Chemisch blockierte Reaktionsklebstoffe . . . 169
3.1.2.2 Mechanisch blockierte Reaktionsklebstoffe . . . 170
3.1.3 Kalt-und warmhärtende Reaktionsklebstoffe . . . 170
3.1.3.1 Kalthärtende Reaktionsklebstoffe . . . 170
3.1.3.'2 Warmhärtende Reaktionsklebstoffe . . . 171
3.1.4 Lösungsmittelhaltige Reaktionsklebstoffe . . . 172
3.2 Lösungsmittelklebstoffe . . . 172
3.3 Kontaktklebstoffe . . . 176
3.4 Haftklebstoffe . . . 178
3.4.1 Grundlagen der Haftklebung . . . 181
3.4.1.1 Klebschichtfestigkeit als Folge des strömungsmechanischen Verhaltens von Flüssigkeiten . . . 181
3.4.1.2 Klebschichtfestigkeit als Folge des Oberflächenspannungsverhaltens von Flüssigkeiten . . . 183
3.4.2 Klebrigkeit (Tack) . . . 184
3.5 Dispersionsklebstoffe . . . 185
3.6 Schmelzklebstoffe . . . 189
3.6.1 Aufbau der Schmelzklebstoffe . . . 189
3.6.2 Charakteristische Merkmale der Schmelzklebstoffe 191
3.6.3 Verarbeitung der Schmelzklebstoffe . . . 194
3.6.4 Eigenschaften der Schmelzklebstoffe . . . 196
3.7 Heißsiegelklebstoffe . . . 198
3.8 Kaschier-, Laminierklebstoffe . . . 199
3.9 Wärmebeständige Klebstoffe . . . 200
3.10 Klebstoffe für Anwendungen bei tiefen Temperaturen . . . 205
3.11 Leitfähige Klebstoffe . . . 205
3.11.1 Elektrisch leitende Klebstoffe . . . 206
3.11.1.1 Isotrop leitende Klebstoffe . . . 206
3.11.1.2 Anisotrop leitende Klebstoffe . . . 211
3.11.2 Wärmeleitende Klebstoffe . . .' . . . 213
3.11.3 Volumeneffekt bei Klebschichten mit Füllstoffen . . . 214
3.12 Mikroverkapselte Klebstoffe . . . 215
3.13 Plastisole . . . 217
3.14 Klebstoffolien . . . 218
3.14.1 Chemisch reagierende Klebstoffolien . . . 218
3.14.2 Physikalisch abbindende Klebstoffolien . . . 219
3.15 Klebebänder . . . 220
3.16 Klebestreifen . . . 225
3.17 Dichtstoffe . . . 225
3.17.1 Einteilung und Aufbau der Dichtstoffe . . . 226
3.17.2 Eigenschaften der Dichtstoffe . . . 228

3.18 Gießharze . . . 230
3.19 Polymermörtel . . . 231

4 Eigenschaften der Klebschichten . . . 233
4.1 Allgemeine Betrachtungen . . . 233
4.2 Schubmodul . . . 234
4.3 Das Schubspannungs-Gleitungs-Verhalten . . . 236
4.4 Die thermomechanischen Eigenschaften . . . 241
4.4.1 Zustandsbereiche . . . 241
4.4.2 Abhängigkeit des Schubmoduls und des mechanischen Verlustfaktors von der Temperatur . . . 246
4.4.3 Abhängigkeit der Klebfestigkeit von der Temperatur . . . 248
4.5 Elastizitätsmodul . . . 250
4.6 Kriechen . . . 254
4.7 Kristallinität . . . 260
4.8 Klebschichtinhomogenitäten . . . 261
4.9 Klebschichtmorphologie und strukturabhängiges mechanisches Verhalten . . . 262

5 **Klebtechnische Eigenschaften der Fügeteilwerkstoffe** . . . 265
5.1 Oberflächeneigenschaften . . . 265
5.1.1 Oberflächenschichten . . . 265
5.1.2 Molekularer Aufbau und Polarität der Grenz- und Reaktionsschichten . . . 266
5.1.3 Oberflächenanalytische Untersuchungsmethoden . . . 269
5.1.4 Geometrische Struktur . . . 272
5.1.5 Oberflächenspannung und Benetzungsvermögen . . . 277
5.1.6 Diffusions-und Lösungsverhalten . . . 277
5.2 Werkstoffeigenschaften . . . 277
5.2.1 Festigkeit . . . 277
5.2.2 Chemischer Aufbau . . . 279
5.2.3 Wärmeleitfähigkeit . . . 281
5.2.4 Wärmeausdehnungskoeffizient . . . 281

6 Bindungskräfte in Klebungen . . . 283
6.1 Die Natur der Bindungskräfte . . . 284
6.1.1 Homöopolare Bindung (Atombindung, unpolare Bindung, kovalente Bindung) . . . 285
6.1.2 Heteropolare Bindung (Ionenbindung, polare Bindung, elektrostatische Bindung) . . . 285
6.1.3 Metallische Bindung . . . 285
6.1.4 Zwischenmolekulare Bindungen . . . 285
6.1.4.1 Dipolkräfte . . . 286
6.1.4.2 Induktionskräfte . . . 288
6.1.4.3 Dispersionskräfte . . . 288
6.1.4.4 Wasserstoffbrückenbindung . . . 288

6.1.5 Sorption . . . 290
6.2 Adhäsion . . . 292
6.2.1 Spezifische Adhäsion . . . 293
6.2.2 Mechanische Adhäsion . . . 300
6.3 Kohäsion . . . 301
6.4 Benetzung von Oberflächen durch Klebstoffe . . . 303
6.4.1 Allgemeine Betrachtungen . . . 303
6.4.2 Thermodynamische Grundlagen . . . 304
6.4.2.1 Benetzungwinkel . . . 304
6.4.2.2 Oberflächenspannung . . . 305
6.4.2.3 Oberflächenenergie . . . 306
6.4.2.4 Kritische Oberflächenspannung . . . 306
6.4.2.5 Grenzflächenspannung . . . 307
6.4.2.6 Adhäsionsarbeit . . . 307
6.4.2.7 Kohäsionsarbeit . . . 308
6.4.2.8 Benetzungsgleichgewicht . . . 308
6.4.2.9 Benetzung als Folge unpolarer und polarer Kraftwirkungen 310
6.4.3 Zusammenhang zwischen Benetzung und Adhäsionsarbeit 312
6.4.4 Experimentelle Bestimmung des Benetzungsverhaltens von Oberflächen . . . 315
6.4.4.1 Randwinkelmessung . . . 316
6.4.4.2 Messung mittels Testflüssigkeiten . . . 317

7 Eigenschaften von Klebungen . . . 319
7.1 Vorteile und Nachteile von Klebungen . . . 319
7.1.1 Vorteile von Klebungen . . . 321
7.1.2 Nachteile von Klebungen . . . 325
7.2 Eigenspannungen in Klebungen . . . 327
7.2.1 Eigenspannungen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten von Fügeteilwerkstoff und Klebschicht . . . 327
7.2.2 Eigenspannungen durch Schwindung der Klebschicht . . . 331
7.2.3 Eigenspannungen durch unterschiedliche Temperaturverteilungen . . . 335
7.2.4 Eigenspannungen durch Temperäturwechsel-beanspruchung . . . 335
7.2.5 Eigenspannungen durch Alterungsvorgänge der Klebschicht . . . 336
7.3 Bruchverhalten von Klebungen . . . 336
7.3.1 Adhäsionsbruch . . . 337
7.3.2 Kohäsionsbruch . . . 339
7.3.3 Bruchmechanische Betrachtungsweise . . . 340
7.4 Verhalten von Klebungen bei Beanspruchungen durch mechanische Belastungen und Umgebungseinflüsse . . . 342
7.4.1 Allgemeine Betrachtungen . . . 342
7.4.2 Alterung von Klebungen durch Feuchtigkeitseinflüsse . . . 344

7.4.3 Beanspruchungseinflüsse als Grundlage für die Berechnung von Metallklebungen . . . 351
7.4.4 Wirkung energiereicher Strahlen auf Klebschichten 364

8 Festigkeiten von Metallklebungen . . . 365
8.1 Allgemeine Betrachtungen . . . 365
8.2 Einflußgrößen auf die Festigkeit von Metallklebungen . . 366
8.3 Spannungen in Metallklebungen mit dünnen, verformungsarmen Klebschichten . . . 368
8.3.1 Zugspannungen - Zugfestigkeit . . . 369
8.3.1.1 Zugspannungen bei senkrechter und zentrischer (momentenfreier) Belastung . . . 369
8.3.1.2 Spannungen beim Auftreten eines Biegemoments . . . 371
8.3.1.3 Zugspannungen bei exzentrischer Belastung . . . 372
8.3.2 Schubspannungen - Schubfestigkeit . . . 374
8.3.3 Zugscherspannungen - Klebfestigkeit . . . 375
8.3.3.1 Spannungsverteilung bei unendlich starren Fügeteilen mit elastischer Klebschichtverformung ohne Auftreten eines Biegemoments . . . 376
8.3.3.2 Spannungsverteilung bei elastischen Fügeteilen mit elastischer Klebschichtverformung ohne Auftreten eines Biegemoments . . . 376
8.3.3.3 Spannungsverteilung bei elastischen Fügeteilen mit elastisch-plastischer Klebschichtverformung und Auftreten eines Biegemoments . . . 379
8.3.3.4 Klebfestigkeit . . . 379
8.3.3.5 Zusammenhang zwischen Klebfestigkeit und Klebschichtverformung . . . 383
8.3.3.6 Abhängigkeit der Spannungsverteilung von der Temperatur . . . 385
8.3.3.7 Experimentelle Bestimmung der Spannungsverteilung durch Schubspannungs-Gleitungs-Diagramme . . . 386
8.3.4 Schälspannungen - Schälwiderstand . . . 390
8.4 Einfluß der geometrischen Gestaltung der Klebfuge auf die Klebfestigkeit einschnittig überlappter Klebungen *p* 392
8.4.1 Überlappungslänge . . . 393
8.4.1.1 Abhängigkeit der übertragbaren Last von der Überlappungslänge . . . 396
8.4.1.2 Abhängigkeit der übertragbaren Last von der Überlappungslänge und der Temperatur . . . 398
8.4.2 Fügeteildicke . . . 400
8.4.3 Gestaltfaktor . . . 401
8.4.4 Überlappungsverhältnis . . . 402
8.4.5 Überlappungsbreite . . . 403
8.4.6 Klebfläche . . . 403
8.4.7 Klebschichtdicke . . . 404

8.4.8 Einfluß der Überlappungslänge, Fügeteildicke und Klebschichtdicke auf das Biegemoment 408
8.4.9 Schaffung 409
8.5 Berechnung der Spannungsverteilung in einschnittig überlappten Klebungen 411
8.5.1 Spannungsverteilung bei Annahme eines linearen Spannungs-Verformungs-Verhaltens der Klebschicht . . . 412
8.5.1.1 Spannungsverteilung nach Volkersen 412
8.5.1.2 Spannungsverteilung nach Goland und Reissner 413
8.5.1.3 Vergleich der Berechnungsansätze nach Volkersen sowie Goland und Reissner mit experimentellen Ergebnissen . . 414
8.5.1.4 Spannungsverteilung nach Hart-Smith 416
8.5.2 Spannungsverteilung bei Annahme eines nichtlinearen Spannungs-Verformungs-Verhaltens der Klebschicht . . . 416
8.5.3 Spannungsverteilung auf der Grundlage theoretischer und experimenteller Ergebnisse 418
8.5.3.1 Verfahren nach Frey 418
8.5.3.2 Verfahren nach Winter und Meckelburg 419
8.5.3.3 Verfahren nach Müller 419
8.5.3.4 Verfahren nach Tombach 419
8.5.3.5 Verfahren nach Eichhorn und Braig 420
8.5.3.6 Verfahren nach Schlegel 420
8.5.3.7 Verfahren nach Cornelius und Stier 420
8.5.4 Berechnung der Spannungsverteilung mittels der Methode Finiter-Elemente 421
8.6 Festigkeit bei statischer Langzeitbeanspruchung 422
8.7 Festigkeit bei dynamischer Langzeitbeanspruchung . . . 425
8.7.1 Zugschwellfestigkeit 426
8.7.2 Dauerschwingfestigkeit 426
8.8 Festigkeit bei schlagartiger Beanspruchung 430
8.9 Erhöhung der Festigkeit durch Kombinationskiebungen . 432
8.10 Spannungen in Metallklebungen mit dicken, elastischen Klebschichten 434
8.11 Abschließende Bemerkungen zum Festigkeitsverhalten von Metallklebungen 439

9 Berechnung von Metallklebungen 441
9.1 Allgemeine Betrachtungen 441
9.2 Berechnungsansätze 442
9.2.1 Einfluß der unterschiedlichen Festigkeiten von Fügeteilwerkstoff und Klebschicht 442
9.2.2 Einflußparameter für die Berechnung von Metallklebungen 444
9.2.3 Berechnung auf Gründlage der Klebfestigkeit 445
9.2.4 Berechnung auf Grundlage der Volkersen-Gleichung nach Schliekelmann 446

9.2.5 Abhängigkeit der übertragbaren Last vomder Überlappungslänge nach der Volkersen-Gleichung 452
9.2.6 Berechnungsbeispiele 453
9.2.7 Berechnung unter Einbeziehung von Abminderungsfaktoren 456
9.2.8 Klebnutzungsgrad 458
9.2.9 Ergänzende Betrachtungen zu der Berechnung von Metallklebungen 461

10 Kleben runder Klebfugengeometrien 463
10.1 Kleben rohrförmiger Fügeteile 464
10.1.1 Einfluß der Klebschichtdicke auf die Festigkeit 464
10.1.2 Einfluß der Fügeteildicke und der Überlappungslänge auf die Festigkeit 465
10.1.3 Berechnung der in axialer Richtung übertragbaren Last bei überlappten Rohrklebungen 466
10.1.4 Berechnung der in tangentialer Richtung übertragbaren Last bei überlappten Rohrklebungen 467
10.2 Kleben von Welle-Nabe-Verbindungen 467
10.2.1 Allgemeine Betrachtungen 467
10.2.2 Berechnung von Welle-Nabe-Verbindungen 468
10.2.2.1 Einfluß der Nabenbreite 469
10.2.2.2 Einfluß der Klebschichtdicke und der Rauhtiefe 470
10.2.2.3 Übertragbares Torsionsmoment 472
10.2.2.4 Berechnungsbeispiel 474
10.2.3 Festlegung von Abminderungsfaktoren 475
10.3 Klebschrumpfen 478
10.3.1 Querpreßklebverbindungen 479
10.3.2 Längspreßklebverbindungen 483

11 Konstruktive Gestaltung von Metallklebungen 485
11.1 Vorhandensein ausreichender Klebflächen 486
11.2 Vermeidung von Spannungsspitzen 489

12 Technologie des Klebens 495
12.1 Allgemeine Betrachtungen 495
12.2 Oberflächenbehandlung der Fügeteile 498
12.2.1 Oberflächenvorbereitung 499
12.2.1.1 Säubern, Passendmachen 499
12.2.1.2 Entfetten 500
12.2.2 Oberflächenvorbehandlung 503
12.2.2.1 Mechanische Oberflächenvorbehandlung 503
12.2.2.2 Kombinierte mechanische-chemisch/thermische Oberflächenvorbehandlung (SACO-, Silicoater- Verfahren) 506
12.2.2.3 Physikalische Oberflächenvorbehandlung 507
12.2.2.4 Chemische Oberflächenvorbehandlung 507
12.2.2.5 Elektrochemische Oberflächenvorbehandlung 508

12.2.3 Oberflächennachbehandlung . . . 509
12.2.4 Zusammensetzung der wichtigsten Beizlösungen . . . 510
12.3 Klebstoffverarbeitung . . . 512
12.3.1 Vorbereitung der Klebstoffe . . . 512
12.3.1.1 Viskosität der Klebstoffe . . . 514
12.3.1.2 Thixotropie der Klebstoffe . . . 515
12.3.2 Mischen der Klebstoffe . . . 516
12.3.3 Dosieren und Auftragen der Klebstoffe . . . 520
12.3.4 Abbinden der Klebstoffe . . . 528
12.3.5 Verfahren zum Abbinden der Klebstoffe . . . 532
12.4 Herstellung von Klebungen . . . 536
12.4.1 Kleben als Fertigungssystem . . . 536
12.4.1.1 Allgemeine Betrachtungen . . . 536
12.4.1.2 Klebtechnische Ausbildung . . . 536
12.4.2 Auswahl von Klebstoffen . . . 537
12.4.2.1 Auswahl von Klebstoffen unter anwendungsspezifischen Gesichtspunkten . . . 537
12.4.2.2 Rechnergestützte Klebstoffauswahl . . . 540
12.4.2.3 Kenndaten des Klebvorgangs . . . 542
12.4.3 Fehlermöglichkeiten beim Kleben und Abhilfemaßnahmen 542
12.5 Sicherheits- und Umweltschutzmaßnahmen bei der Verarbeitung von Klebstoffen . . . 545
12.6 Klassifizierung wichtiger Klebstoffarten nach arbeitsphysiologischen und verarbeitungstechnologischen Gesichtspunkten . . . 550
12.7 Kombinierte Fügeverfahren . . . 550
12.7.1 Punktschweißkleben . . . 552
12.7.1.1 Vorteile gegenüber reinen Punktschweißverbindungen . . 552
12.7.1.2 Vorteile gegenüber reinen Klebungen . . . 552
12.7.1.3 Verfahrensdurchführung . . . 552
12.7.1.4 Einfluß der Fügeteilwerkstoffe . . . 553
12.7.1.5 Mechanisches Verhalten von Punktschweißklebungen . . 554
12.7.2 Nieten - Kleben und Schrauben - Kleben . . . 556
12.7.3 Falzen - Kleben . . . 557
12.7.4 Durchsetzfügen - Kleben . . . 557
12.7.5 Schrumpfen - Kleben . . . 558
12.8 Kleben beölter Bleche . . . 559
12.9 Kleben in feuchter Atmosphäre (Unterwasserkleben) . . . 560
12.10 Demontage von Klebungen („Entkleben") . . . 561

13 Kleben metallischer Werkstoffe . . . 565
13.1 Allgemeine Betrachtungen . . . 565
13.2 Klebbarkeit wichtiger Metalle . . . 566
13.2.1 Aluminium und Aluminiumlegierungen . . . 566
13.2.2 Beryllium . . . 569
13.2.3 Blei . . . 569

13.2.4 Chrom, verchromte Werkstoffe . . . 570
13.2.5 Edelmetalle . . . 570
13.2.6 Kupfer . . . 570
13.2.7 Magnesium . . . 571
13.2.8 Messing . . . 571
13.2.9 Nichtrostende Stähle, Edelstahle . . . 572
13.2.10 Nickel, vernickelte Werkstoffe . . . 573
13.2.11 Stähle, allgemeine Baustähle . . . 573
13.2.12 Titan . . . 574
13.2.13 Verzinkte Stähle, Zink . . . 576
13.3 Kleben von Metallkombinationen . . . 578
13.4 Kleben von Blechen mit organischen und anorganischen Beschichtungen . . . 580

14 Kleben der Kunststoffe und weiterer nichtmetallischer Werkstoffe . . . 583
14.1 Kleben der Kunststoffe . . . 583
14.1.1 Grundlagen . . . 583
14.1.2 Mechanische Oberflächenvorbehandlung . . . 589
14.1.2.1 Reinigen der Oberfläche . . . 589
14.1.2.2 Aufrauhen der Oberfläche . . . 590
14.1.3 Chemische Oberflächenvorbehandlung . . . 591
14.1.4 Physikalische Oberflächenvorbehandlung . . . 593
14.1.4.1 Niederdruckplasma-Vorbehandlung . . . 594
14.1.4.2 Vorbehandlung mittels Corona-Entladung . . . 598
14.1.4.3 Thermische Vorbehandlung . . . 603
14.1.4.4 Laser-Vorbehandlung . . . 604
14.1.4.5 Ionenätzen, Sputtern . . . 605
14.1.5 Klebstoffe für Kunststoffe . . . 605
14.1.5.1 Lösungsmittelklebstoffe . . . 606
14.1.5.2 Diffusionsklebung . . . 606
14.1.5.3 Reaktionsklebstoffe . . . 608
14.1.5.4 Schmelzklebstoffe . . . 609
14.1.6 Klebbarkeit ausgewählter Kunststoffe . . . 609
14.1.6.1 Thermoplastische Kunststoffe, in organischen Lösungsmitteln löslich bzw. quellbar . . . 610
14.1.6.1.1 Polyvinylchlorid (PVC) . . . 611
14.1.6.1.2 Polystyrol (PS) . . . 611
14.1.6.1.3 Polymethylmethacrylat, Acrylglas (PMMA) . . . 611
14.1.6.1.4 Polycarbonat (PC) . . . 612
14.1.6.1.5 Celluloseacetat, Acetylcellulose (CA) . . . 613
14.1.6.1.6 Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymere(ABS) . . . 613
14.1.6.2 Thermoplastische Kunststoffe, in organischen Lösungsmitteln unlöslich . . . 613
14.1.6.2.1 Polyethylen (PE) . . . 613
14.1.6.2.2 Polypropylen (PP) . . . 614

14.1.6.2.3 Polytetrafluorethylen, Teflon (PTFE) . . . 614
14.1.6.2.4 Polyamide (PA) . . . 615
14.1.6.2.5 Polyethylenterephthalat, Polyester (PET, SP) . . . 615
14.1.6.2.6 Polyimide (PI) . . . 616
14.1.6.2.7 Polyoxymethylen, Polyacetate (POM) . . . 616
14.1.6.2.8 Polyetherketone (PEK) . . . 616
14.1.6.2.9 Polyetherimide (PEI) . . . 617
14.1.6.2.10 Polysulfone (PSU) . . . 617
14.1.6.2.11 Polyphenylenether, Polyoxyphenylene (PEE) . . . 617
14.1.6.2.12 Polyphenylensulfide, Polyarylensulfide (PPS) . . . 617
14.1.6.2.13 Polyvinylidenfluoride(PVDF,PVF_2) . . . 617
14.1.6.3 Duromere Kunststoffe, in organischen Lösungsmitteln unlöslich . . . 617
14.1.6.3.1 Epoxidharz-Kunststoffe (EP) . . . 618
14.1.6.3.2 Formaldehydkondensate . . . 618
14.1.6.3.3 Polyurethanschaum . . . 618
14.1.6.3.4 Silicon-Kautschuk . . . 618
14.1.6.4 Faserverstärkte Kunststoffe . . . 619
14.1.6.4.1 Oberflächenvorbehandlung . . . 620
14.1.6.4.2 SMC/BMC-Formmassen . . . 621
14.1.7 Festigkeit und konstruktive Gestaltung von Kunststoffklebungen . . . 622
14.1.8 Kleben von Kunststoffen mit Metallen . . . 624
14.1.8.1 Spannungen in Kunststoff-Metall-Klebungen . . . 625
14.1.8.2 Konstruktive Gestaltung von Kunststoff-Metall-Klebungen 629
14.1.8.3 Klebstoffe für Kunststoff-Metall-Klebungen . . . 630
14.1.8.4 Prüfung von Kunststoff- und Kunststoff-Metall-Klebungen 631
14.2 Kleben von Glas . . . 631
14.2.1 Grundlagen . . . 631
14.2.2 Oberflächenbehandlung . . . 634
14.2.3 Klebstoffe . . . 634
14.2.4 Kleben von Glas mit Metallen . . . 636
14.3 Kleben von Keramik . . . 637
14.4 Kleben von Gummi . . . 637
14.4.1 Gummi/Gummi-Klebung . . . 638
14.4.1.1 Klebstoffe . . . 638
14.4.1.2 Oberflächenvorbehandlung vulkanisierter Kautschuktypen 639
14.4.1.3 Bindung unvulkanisierter Kautschuktypen . . . 640
14.4.1.4 Ethylen/Propylen-Dien-Terpolymerisate(EPDM) . . . 640
14.4.2 Gummi/Metall-Bindung . . . 641
14.4.2.1 Vernetzung mittels Resorzin-Formaldehyd . . . 642
14.4.2.2 Vernetzung durch Polyisocyanate . . . 642
14.5 KlebenvonHolz . . . 643
14.5.1 Allgemeine Betrachtungen . . . 643
14.5.2 Klebstoffe . . . 645
14.6 Kleben poröser Werkstoffe . . . 647

15 Industrielle Anwendungen des Klebens 649
15.1 Allgemeine Betrachtungen 649
15.2 Kleben in der Luft-und Raumfahrt 649
15.3 Kleben im Fahrzeugbau 653
15.4 Kleben im Maschinenbau 656
15.5 Kleben in der Elektronik 658
15.6 Kleben in der Papierverarbeitung 660
15.7 Kleben in der Medizin 661
15.8 Anwendungen des Klebens bei Reparaturen 662
15.9 Literatur zu weiteren industriellen Anwendungen 665

16 Prüfung und Qualitätssicherung von Klebstoffen und Klebungen 667
16.1 Allgemeine Betrachtungen 667
16.1.1 Qualitätsmanagement in der Klebtechnik 668
16.1.2 Einzelmaßnahmen für ein Qualitätssicherungskonzept „Fertigungssystem Kleben" 669
16.2 Zerstörende Prüfverfahren 670
16.2.1 Prüfverfahren für statische Kurzzeitbeanspruchungen . . . 672
16.2.1.1 Beanspruchung auf Zugscherung 672
16.2.1.2 Beanspruchung auf Schub (Schubspannungs-Gleitungs-Verhalten, Verdrehscherfestigkeit) 673
16.2.1.3 Beanspruchung auf Zug (Zugfestigkeit) 675
16.2.1.4 Beanspruchung auf Druckscherung (Druckscherfestigkeit) 675
16.2.1.5 Beanspruchung auf Torsion (Torsionsscherfestigkeit, Losbrechmoment) 675
16.2.1.6 Beanspruchung auf Schälung (Winkelschälversuch, Naß-Schäl-Test, Rollenschälversuch, Klettertrommel-schälversuch, Folienschälversuch) 676
16.2.1.7 Beanspruchung auf Spaltung (Biegeschälversuch, Keiltest) 679
16.2.2 Prüfverfahren für statische und dynamische Langzeitbeanspruchungen 684
16.2.2.1 Prüfung der Zeitstandfestigkeit 684
16.2.2.2 Prüfung der Dauerschwingfestigkeit 684
16.2.3 Prüfung bei schlagartiger Beanspruchung 685
16.2.4 Prüfverfahren für Langzeitbeanspruchung unter Alterungseinflüssen 686
16.2.4.1 Allgemeine Betrachtungen 686
16.2.4.2 Abkürzungsverfahren für Langzeitbeanspruchungen . . . 686
16.2.5 Prüfung mittels Schallemissionsanalyse 690
16.3 Zerstörungsfreie Prüfverfahren 691
16.3.1 Akustische Verfahren auf Basis Ultraschall 692
16.3.1.1 Resonanzverfahren 692
16.3.1.2 Impuls-Echo-Verfahren 693
16.3.1.3 Durchschallungsverfahren 693
16.3.2 Elektrische Verfahren 694

16.3.3 Thermische Verfahren . . . 694
16.3.4 Strahlungsverfahren . . . 695
16.3.5 Holographische Verfahren . . . 695
16.4 Prüfung des Härtungsverlaufs von Klebstoffen und der resultierenden Klebschichteigenschaften . . . 695
16.4.1 Dynamisch-Mechanische-Thermoanalyse (DMTA) . . . 696
16.4.2 Differential-Thermo-Analyse(DTA) . . . 700
16.4.3 Dielektrische-Thermoanalyse (DETA) . . . 700
16.4.4 Thermogravimetrische Analyse (TGA) . . . 700
16.4.5 Infrarot-(IR)-Spektroskopie . . . 701
16.4.6 Chromatographie . . . 701
16.4.7 Weitere in der Literatur beschriebene Methoden . . . 703

17 Anhang . . . 705
17.1 Verzeichnis von Normen, Richtlinien und Merkblättern zum Kleben und zu verwandten Gebieten . . . 705
17.1.1 Allgemeine Normen . . . 705
17.1.2 Definitionen und Prüfungen von Klebstoffen . . . 705
17.1.3 Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen . . . 706
17.1.4 Alterungs-und Klimaprüfungen . . . 707
17.1.5 Oberflächenbehandlung und-prüfung . . . 707
17.1.6 Kurzbezeichnungen und Prüfung von Kunststoffen . . . 708
17.1.7 Haftklebstoffe . . . 709
17.1.8 Schmelzklebstoffe . . . 709
17.1.9 Kleben von Kunststoffen . . . 709
17.1.10 KlebenvonHolz . . . 709
17.1.11 Kleben von Leder und Schuhwerkstoffen . . . 710
17.1.12 Dichtstoffe . . . 710
17.1.13 Prüfung von Materialeigenschaften metallischer Werkstoffe 711
17.1.14 Definitionen und Messungen mechanischer, physikalischer und thermodynamischer Größen . . . 711
17.2 Verzeichnis ausgewählter ASTM-Methoden für die Prüfung von Klebstoffen und Klebungen . . . 712
17.3 Kurzzeichen für Klebstoffgrundstoffe und wichtige Kunststoffe (nach DIN 7728 Teil 1) . . . 714
17.4 Ausgewählte Umrechnungsfaktoren angelsächsischer Einheiten und SI-Einheiten für klebtechnische Berechnungen 716
17.5 Ausgewählte deutsch-englische und englisch-deutsche Begriffe aus dem Gebiet des Klebens . . . 717

18 Literatur . . . 737
Veröffentlichungen aus nationalen und internationalen Fachzeitschriften . . . 737
Bücher aus dem deutschen Sprachraum . . . 847
Bücher aus dem angelsächsischen Sprachraum . . . 848

Stichwortverzeichnis . . . 851