

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen	XXV
---	-----

Einleitung	1
------------	---

1	Einteilung und Aufbau der Klebstoffe	3
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
2	Klebstoffgrundstoffe	15
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- 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 Glutinbasis	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
3	Klebstoffarten	169
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- 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 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

4	Eigenschaften der Klebschichten	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 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 mechanisches Verhalten	293
5	Klebtechnische Eigenschaften der Füge­teilwerkstoffe	295
5.1	Oberflächeneigenschaften	295
5.1.1	Oberflächenschichten	295
5.1.2	Molekularer Aufbau und Polarität der Grenz- und 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 (TOF-SIMS)	301
5.1.3.7	Infrarotspektroskopie mit abgeschwächter Totalreflektion (ATR)	301
5.1.3.8	Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Transmissions- 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

6	Bindungskräfte in Klebungen	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- 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 Kraftwirkungen	344
6.4.3	Zusammenhang zwischen Benetzung und Adhäsionsarbeit	345
6.4.4	Experimentelle Bestimmung des Benetzungsverhaltens von Oberflächen	348
6.4.4.1	Randwinkelmessung	349
6.4.4.2	Messung mittels Testflüssigkeiten	350
7	Eigenschaften von Klebungen	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 Wärmeausdehnungskoeffizienten von gleichen Füge- teilwerkstoffen und Klebschicht	361

7.2.2	Eigenspannungen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten von Fügeteilkombinationen 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 Feuchtigkeitsalterung	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
8	Festigkeiten von Metallklebungen	403
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 Füge- teilen mit elastischer Klebschichtverformung ohne Auftreten eines Biegemoments	413
8.3.3.2	Spannungsverteilung bei elastischen Füge- teilen mit elastischer Klebschichtverformung ohne Auftreten eines Biegemoments	414
8.3.3.3	Spannungsverteilung bei elastischen Füge- teilen 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 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 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 von Metallklebungen	480
9	Berechnung von Metallklebungen	483
9.1	Allgemeine Betrachtungen	483
9.2	Berechnungsansätze	484
9.2.1	Einfluss der unterschiedlichen Festigkeiten von 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 Schliekelmann	488
9.2.5	Abhängigkeit der übertragbaren Last von der Überlappungslänge nach der Volkersen-Gleichung	494
9.2.6	Berechnungsbeispiele	495
9.2.7	Berechnung unter Einbeziehung von Abminderungsfaktoren	498
9.2.8	Klebnutzungsgrad	500
9.2.9	Ergänzende Betrachtungen zu der Berechnung von Metallklebungen	503
10	Kleben runder Klebfugegeometrien	505
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	Konstruktive Gestaltung von Metallklebungen	529
11.1	Vorhandensein ausreichender Klebflächen	529
11.2	Vermeidung von Spannungsspitzen	533
12	Technologie des Klebens	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 Fügeteilwerkstoffe	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	Kleben metallischer Werkstoffe	625
13.1	Allgemeine Betrachtungen	625
13.2	Klebarkeit 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 Beschichtungen	642
14	Kleben der Kunststoffe und weiterer nichtmetallischer Werkstoffe	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 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	Klebbarkeit 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, Polyarylensulfide (PPS)	693
14.1.6.2.14	Polyvinylidenfluoride (PVDF, PVF ₂)	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	Formaldehydkondensate	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	Glasklebungen am Bau (Structural Glazing)	716
14.2.6	Glasklebungen im Fahrzeugbau (Direct Glazing)	717
14.2.7	Kleben von optischen Bauteilen	717
14.2.8	Glas-Metall- und Glas-Kunststoff-Klebungen	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 (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/Prophylen-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-Klebungen	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
15	Industrielle Anwendungen des Klebens	739
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 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

16	Prüfung und Qualitätssicherung von Klebstoffen und Klebungen	777
16.1	Allgemeine Betrachtungen	777
16.1.1	Qualitätsmanagement in der Klebtechnik	778
16.1.2	Einzelmaßnahmen für ein Qualitätssicherungskonzept „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- Verhalten, Verdrehstabilität)	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, Losbrechmoment)	785
16.2.1.6	Beanspruchung auf Schälung (Winkelschälversuch, Nass-Schäl-Test, Rollenschälversuch, Klettertrommel- schälversuch, Folienschälversuch)	786
16.2.1.7	Beanspruchung auf Spaltung (Biegeschälversuch, Keiltest)	789

16.2.2	Prüfverfahren für statische und dynamische 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 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 und Härtungsreaktionen	807
16.4.1	Dynamisch-Mechanische-Thermoanalyse (DMTA) 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) Thermogravimetrie (TG)	814
16.4.6	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	814
16.4.7	Thermomechanische Analyse, Dilatometrie (TMA)	815
16.4.8	Mikrothermische Analyse (μ TA)	815
16.4.9	Infrarot-(IR)-Spektroskopie	815
16.4.10	Kern-(Spin-)Resonanz-Spektroskopie (Nuclear-Magnetic-Resonance NMR)	817
16.4.11	Chromatographie	818
16.4.12	Weitere in der Literatur beschriebene Methoden	819

17	Anhang	821
17.1	Verzeichnis von Normen, Standards, Richtlinien und Merkblättern zum Kleben und zu verwandten Gebieten	821
17.1.1	Allgemeine Normen	822
17.1.2	Definitionen und Prüfungen von Klebstoffen; 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- 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 und thermodynamischer Größen	833
17.2	Verzeichnis ausgewählter ASTM-Methoden für die Prüfung von Klebstoffen und Klebungen	834
17.3	Kurzzeichen für Klebstoffgrundstoffe und Kunststoffe	837
17.4	Ausgewählte Umrechnungsfaktoren angelsächsischer Ein- heiten und SI-Einheiten für klebtechnische Berechnungen	840
17.5	Ausgewählte deutsch-englische und englisch-deutsche Begriffe aus dem Gebiet des Klebens	841
18	Literatur	863
	Veröffentlichungen aus nationalen und internationalen Fachzeitschriften	863
	Bücher aus dem deutschen Sprachraum	1021
	Bücher aus dem angelsächsischen Sprachraum	1022
19	Sachverzeichnis	1025