

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen	XVII
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	6
1.3.1 Chemischer Aufbau der Monomere	6
1.3.2 Aufbau der Polymere	8
1.3.2.1 Reaktionsmechanismen zur Polymerbildung	8
1.3.2.2 Struktur der Polymere	9
2 Klebstoffgrundstoffe	12
2.1 Polymerisationsklebstoffe	12
2.1.1 Einkomponenten-Polymerisationsklebstoffe	13
2.1.1.1 Cyanacrylatklebstoffe	13
2.1.1.2 Anaerobe Klebstoffe (Diacrylsäureester)	15
2.1.1.3 Strahlungshärtende Klebstoffe	19
2.1.2 Zweikomponenten-Polymerisationsklebstoffe	20
2.1.2.1 Methacrylatklebstoffe	20
2.1.2.2 Verarbeitungssysteme der Methylmethacrylatklebstoffe	21
2.1.3 Polymere als Grundstoffe für Polymerisationsklebstoffe	24
2.1.3.1 Polyvinylacetat	24
2.1.3.2 Polyvinylalkohol	24
2.1.3.3 Polyvinyläther	25
2.1.3.4 Ethylen-Vinylacetat	25
2.1.3.5 Ethylen-Acrylsäure-Copolymere	26
2.1.3.6 Polyvinylacetale	26
2.1.3.7 Polystyrol	27
2.1.3.8 Polyvinylchlorid	27
2.1.3.9 Polyvinylidenchlorid	27
2.1.4 Kautschukpolymere	28
2.1.4.1 Styrol-Butadien-Kautschuk	28
2.1.4.2 Chloroprenkautschuk	30

2.1.4.3	Nitrilkautschuk	31
2.1.4.4	Butylkautschuk	31
2.1.5	Sonstige Thermoplaste	32
2.1.5.1	Polyethylen	32
2.1.5.2	Polypropylen	32
2.1.5.3	Fluorierte Kohlenwasserstoffe	33
2.2	Polyadditionsklebstoffe	33
2.2.1	Epoxidharzklebstoffe	33
2.2.1.1	Aufbau der Epoxidharze	33
2.2.1.2	Kalthärtende Epoxidharzklebstoffe	35
2.2.1.3	Warmhärtende Epoxidharzklebstoffe	36
2.2.1.4	Zweikomponenten-Epoxidharzklebstoffe	37
2.2.1.5	Einkomponenten-Expoxidharzklebstoffe	38
2.2.1.6	Lösungsmittelhaltige Epoxidharzklebstoffe	38
2.2.1.7	Zäh-harte ("toughened") Epoxidharzklebstoffe	38
2.2.2	Polyurethanklebstoffe	39
2.2.2.1	Zweikomponenten-Polyurethanklebstoffe	39
2.2.2.2	Einkomponenten-Polyurethanklebstoffe	40
2.2.2.3	Thermisch aktivierbare Polyurethanklebstoffe	41
2.2.2.4	Reaktive Polyurethan-Schmelzklebstoffe	42
2.2.2.5	Lösungsmittelhaltige Polyurethanklebstoffe	42
2.3	Polykondensationsklebstoffe	42
2.3.1	Formaldehydkondensate	43
2.3.1.1	Phenol-Formaldehydharz-Klebstoffe	43
2.3.1.2	Kresol-/Resorzin-Formaldehydharz-Klebstoffe	45
2.3.1.3	Harnstoff-Formaldehydharz-Klebstoffe	45
2.3.1.4	Melamin-Formaldehydharz-Klebstoffe	47
2.3.2	Polyamide	48
2.3.3	Polyester	50
2.3.3.1	Gesättigte Polyester und Copolyester	50
2.3.3.2	Ungesättigte Polyester	51
2.3.4	Silikone	52
2.3.4.1	Einkomponenten-RTV-Systeme	52
2.3.4.2	Zweikomponenten-RTV-Systeme	54
2.3.5	Polyimide	55
2.3.6	Polybenzimidazole	56
2.3.7	Polysulfone	57
2.4	Zusammenfassende Darstellung der Polyreaktionen	58
2.5	Klebstoffe auf natürlicher Basis	60
2.5.1	Klebstoffe auf Basis tierischer Naturprodukte	61
2.5.2	Klebstoffe auf Basis pflanzlicher Naturprodukte	62
2.6	Klebstoffe auf anorganischer Basis	62
2.7	Klebstoffzusätze und haftvermittelnde Substanzen	65
2.7.1	Härter	65
2.7.2	Vernetzer	66
2.7.3	Beschleuniger und Katalysatoren	67
2.7.4	Weichmacher	67

2.7.5	Harze	68
2.7.6	Füllstoffe	68
2.7.7	Stabilisatoren	70
2.7.8	Haftvermittler	70
2.7.9	Primer	73
3	Klebstoffarten	75
3.1	Reaktionsklebstoffe	75
3.1.1	Reaktionskinetische und physikalische Grundlagen	75
3.1.1.1	Einfluß der Zeit	76
3.1.1.2	Einfluß der Temperatur	78
3.1.1.3	Einfluß des Drucks	79
3.1.1.4	Abhängigkeit der Klebschichtdicke vom Anpreßdruck	81
3.1.1.5	Topfzeit	82
3.1.2	Blockierte Reaktionsklebstoffe	85
3.1.2.1	Chemisch blockierte Reaktionsklebstoffe	85
3.1.2.2	Mechanisch blockierte Reaktionsklebstoffe	86
3.1.3	Kalt- und wärmehärtende Reaktionsklebstoffe	86
3.1.3.1	Kalthärtende Reaktionsklebstoffe	86
3.1.3.2	Wärmehärtende Reaktionsklebstoffe	87
3.1.4	Lösungsmittelhaltige Reaktionsklebstoffe	87
3.2	Lösungsmittelklebstoffe	88
3.3	Kontaktklebstoffe	92
3.4	Haftklebstoffe	93
3.4.1	Grundlagen der Haftklebung	94
3.4.1.1	Haftung als Folge des strömungsmechanischen Verhaltens von Flüssigkeiten	95
3.4.1.2	Haftung als Folge des Oberflächenspannungsverhaltens von Flüssigkeiten	96
3.4.2	Klebrigkeit (Tack)	97
3.5	Dispersionsklebstoffe	98
3.6	Schmelzklebstoffe	100
3.6.1	Aufbau der Schmelzklebstoffe	100
3.6.2	Charakteristische Merkmale der Schmelzklebstoffe	100
3.6.3	Verarbeitung der Schmelzklebstoffe	103
3.6.4	Eigenschaften der Schmelzklebstoffe	105
3.7	Wärmebeständige Klebstoffe	106
3.8	Leitfähige Klebstoffe	110
3.8.1	Elektrisch leitende Klebstoffe	110
3.8.2	Wärmeleitende Klebstoffe	111
3.9	Mikroverkapselte Klebstoffe	112
3.10	Plastisole	113
3.11	Klebstoffolien	114
3.12	Klebebänder	115
3.12.1	Aufbau der Klebebänder	115
3.12.2	Aufbau der Klebestreifen	116

4	Eigenschaften der Klebschichten	118
4.1	Allgemeine Betrachtungen	118
4.2	Schubmodul	119
4.3	Das Schubspannungs-Gleitungs-Verhalten	121
4.4	Die thermomechanischen Eigenschaften	125
4.4.1	Zustandsbereiche	125
4.4.2	Abhängigkeit des Schubmoduls und des mechanischen Verlustfaktors von der Temperatur	129
4.4.3	Abhängigkeit der Klebfestigkeit von der Temperatur	131
4.5	Elastizitätsmodul	133
4.6	Kriechen	137
4.7	Kristallinität	143
4.8	Klebschichtinhomogenitäten	144
5	Klebtechnische Eigenschaften der Füge­teilwerkstoffe	145
5.1	Oberflächeneigenschaften	145
5.1.1	Oberflächenschichten	145
5.1.2	Molekularer Aufbau und Polarität der Grenz- und Reaktionsschichten	146
5.1.3	Geometrische Struktur	147
5.1.4	Oberflächenspannung und Benetzungsvermögen	152
5.1.5	Diffusions- und Lösungsverhalten	152
5.2	Werkstoffeigenschaften	152
5.2.1	Festigkeit	152
5.2.2	Chemischer Aufbau	153
5.2.3	Wärmeleitfähigkeit	154
5.2.4	Wärmeausdehnungskoeffizient	155
6	Bindungskräfte in Klebungen	156
6.1	Die Natur der Bindungskräfte	157
6.1.1	Homöopolare Bindung	157
6.1.2	Heteropolare Bindung	158
6.1.3	Metallische Bindung	158
6.1.4	Zwischenmolekulare Bindungen	158
6.1.4.1	Dipolkräfte	158
6.1.4.2	Induktionskräfte	160
6.1.4.3	Dispersionskräfte	161
6.1.4.4	Wasserstoffbrückenbindung	161
6.1.5	Sorption	162
6.2	Adhäsion	164
6.2.1	Spezifische Adhäsion	165
6.2.2	Mechanische Adhäsion	169
6.3	Kohäsion	170
6.4	Benetzung von Oberflächen durch Klebstoffe	172
6.4.1	Allgemeine Betrachtungen	172
6.4.2	Thermodynamische Grundlagen	173
6.4.2.1	Benetzungswinkel	173
6.4.2.2	Oberflächenspannung	173

6.4.2.3	Oberflächenenergie	174
6.4.2.4	Kritische Oberflächenspannung	175
6.4.2.5	Grenzflächenspannung	175
6.4.2.6	Adhäsionsarbeit	175
6.4.2.7	Kohäsionsarbeit	176
6.4.2.8	Benetzungsgleichgewicht	176
6.4.3	Zusammenhang zwischen Benetzung und Adhäsionsarbeit	179
7	Eigenschaften von Metallklebungen	183
7.1	Vorteile und Nachteile von Klebungen	183
7.1.1	Vorteile von Klebungen	184
7.1.2	Nachteile von Klebungen	188
7.2	Eigenspannungen in Klebungen	190
7.2.1	Eigenspannungen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungs- koeffizienten von Füge­teilwerkstoff und Klebschicht	190
7.2.2	Eigenspannungen durch Schrumpfung der Klebschicht	192
7.2.3	Eigenspannungen durch unterschiedliche Temperaturverteilungen	193
7.2.4	Eigenspannungen durch Temperaturwechselbeanspruchung	193
7.2.5	Eigenspannungen durch Alterungsvorgänge der Klebschicht	194
7.3	Bruchverhalten von Klebungen	194
7.3.1	Adhäsionsbruch	196
7.3.2	Kohäsionsbruch	197
7.3.3	Bruchmechanische Betrachtungsweise	198
7.4	Verhalten von Metallklebungen bei Beanspruchungen durch mechanische Belastungen und Umgebungseinflüsse	200
7.4.1	Allgemeine Betrachtungen	200
7.4.2	Beanspruchungseinflüsse als Grundlage für die Berechnung von Metallklebungen	204
8	Festigkeiten von Metallklebungen	208
8.1	Allgemeine Festigkeitsbetrachtungen	208
8.2	Einflußgrößen auf die Festigkeit von Metallklebungen	209
8.3	Spannungen in Metallklebungen	210
8.3.1	Zugspannungen – Zugfestigkeit	211
8.3.1.1	Zugspannungen bei senkrechter und zentrischer (momentenfreier) Belastung	211
8.3.1.2	Spannungen beim Auftreten eines Biegemoments	212
8.3.1.3	Zugspannungen bei exzentrischer Belastung	212
8.3.2	Schubspannungen – Schubfestigkeit	215
8.3.3	Zugscherspannungen – Klebfestigkeit	216
8.3.3.1	Spannungsverteilung bei unendlich starren Füge­teilen mit elastischer Klebschichtverformung ohne Auftreten eines Biegemoments	216
8.3.3.2	Spannungsverteilung bei elastischen Füge­teilen mit elastischer Klebschichtverformung ohne Auftreten eines Biegemoments	217
8.3.3.3	Spannungsverteilung bei elastischen Füge­teilen mit elastisch- plastischer Klebschichtverformung und Auftreten eines Biegemoments	219
8.3.3.4	Klebfestigkeit	220

8.3.3.5	Zusammenhang zwischen Klebfestigkeit und Klebschichtverformung	223
8.3.3.6	Abhängigkeit der Spannungsverteilung von der Temperatur	225
8.3.3.7	Experimentelle Bestimmung der Spannungsverteilung durch Schubspannungs-Gleitungs-Diagramme	226
8.3.4	Schälspannungen – Schälwiderstand	229
8.4	Einfluß der geometrischen Gestaltung der Klebfuge auf die Klebfestigkeit einschnittig überlappter Klebungen	232
8.4.1	Überlappungslänge	232
8.4.1.1	Abhängigkeit der übertragbaren Last von der Überlappungslänge	235
8.4.1.2	Abhängigkeit der übertragbaren Last von der Überlappungslänge und der Temperatur	238
8.4.2	Fügeteildicke	239
8.4.3	Gestaltfaktor	240
8.4.4	Überlappungsverhältnis	241
8.4.5	Überlappungsbreite	241
8.4.6	Kleblfläche	242
8.4.7	Klebschichtdicke	242
8.4.8	Einfluß der Überlappungslänge, Fügeteildicke und Klebschichtdicke auf das Biegemoment	245
8.4.9	Schäftung	247
8.5	Berechnung der Spannungsverteilung in einschnittig überlappten Klebungen	248
8.5.1	Spannungsverteilung bei Annahme eines linearen Spannungs-Verformungs-Verhaltens der Klebschicht	249
8.5.1.1	Spannungsverteilung nach Volkersen	249
8.5.1.2	Spannungsverteilung nach Goland und Reissner	250
8.5.1.3	Vergleich der Berechnungsansätze nach Volkersen sowie Goland und Reissner mit experimentellen Ergebnissen	251
8.5.1.4	Spannungsverteilung nach Hart-Smith	252
8.5.2	Spannungsverteilung bei Annahme eines nichtlinearen Spannungs-Verformungs-Verhaltens der Klebschicht	253
8.5.3	Spannungsverteilung auf der Grundlage theoretischer und experimenteller Ergebnisse	254
8.5.3.1	Verfahren nach Frey	254
8.5.3.2	Verfahren nach Winter und Meckelburg	255
8.5.3.3	Verfahren nach Müller	255
8.5.3.4	Verfahren nach Tombach	255
8.5.3.5	Verfahren nach Eichhorn und Braig	256
8.5.3.6	Verfahren nach Schlegel	256
8.5.3.7	Verfahren nach Cornelius und Stier	256
8.6	Festigkeit bei statischer Langzeitbeanspruchung	257
8.7	Festigkeit bei dynamischer Langzeitbeanspruchung	259
8.7.1	Zugschwellfestigkeit	260
8.7.2	Dauerschwingfestigkeit	261
8.8	Festigkeit bei schlagartiger Beanspruchung	264
8.9	Erhöhung der Festigkeit durch Kombinationsklebungen	266

8.10	Abschließende Bemerkungen zum Festigkeitsverhalten von Metallklebungen	268
9	Berechnung von Metallklebungen	270
9.1	Allgemeine Betrachtungen	270
9.2	Berechnungsansätze	271
9.2.1	Einfluß der unterschiedlichen Festigkeiten von Füge­teilwerkstoff und Klebschicht	271
9.2.2	Einflußparameter für die Berechnung von Metallklebungen	273
9.2.3	Berechnung auf Grundlage der Klebfestigkeit	273
9.2.4	Berechnung auf Grundlage der Volkersen-Gleichung nach Schliekelmann	275
9.2.5	Abhängigkeit der übertragbaren Last von der Überlappungslänge nach der Volkersen-Gleichung	280
9.2.6	Berechnungsbeispiele	281
9.2.7	Berechnung unter Einbeziehung von Abminderungsfaktoren	283
9.2.8	Klebnutzungsgrad	285
9.2.9	Ergänzende Betrachtungen zu der Berechnung von Metallklebungen	288
10	Kleben runder Klebfugegeometrien	289
10.1	Kleben rohrförmiger Fügeteile	290
10.1.1	Einfluß der Klebschichtdicke auf die Festigkeit	290
10.1.2	Einfluß der Fügeteildicke und der Überlappungslänge auf die Festigkeit	291
10.1.3	Berechnung der in axialer Richtung übertragbaren Last bei überlappten Rohrklebungen	292
10.2	Kleben von Welle-Nabe-Verbindungen	292
10.2.1	Allgemeine Betrachtungen	292
10.2.2	Berechnung von Welle-Nabe-Verbindungen	293
10.2.2.1	Einfluß der Nabenbreite	294
10.2.2.2	Einfluß der Klebschichtdicke und der Rauhtiefe	295
10.2.2.3	Übertragbares Torsionsmoment	297
10.2.2.4	Berechnungsbeispiel	298
10.2.3	Festlegung von Abminderungsfaktoren	299
10.3	Klebschrumpfen	303
11	Konstruktive Gestaltung von Metallklebungen	304
11.1	Vorhandensein ausreichender Klebflächen	304
11.2	Vermeidung von Spannungsspitzen	305
12	Technologie des Klebens	308
12.1	Allgemeine Betrachtungen	308
12.2	Oberflächenbehandlung der Fügeteile	308
12.2.1	Oberflächenvorbereitung	309
12.2.2	Oberflächenvorbehandlung	310
12.2.2.1	Mechanische Oberflächenvorbehandlung	310
12.2.2.2	Chemische Oberflächenvorbehandlung	311

12.2.2.3	Elektrochemische Oberflächenvorbehandlung	312
12.2.3	Oberflächennachbehandlung	312
12.2.4	Zusammensetzung der wichtigsten Beizlösungen	313
12.3	Klebstoffverarbeitung	314
12.3.1	Vorbereitung der Klebstoffe	314
12.3.1.1	Viskosität der Klebstoffe	315
12.3.1.2	Thixotropie der Klebstoffe	316
12.3.2	Mischen der Klebstoffe	316
12.3.3	Auftragen der Klebstoffe	318
12.3.4	Abbinden der Klebstoffe	319
12.3.5	Kenndaten des Klebvorgangs	322
12.4	Voraussetzungen zur Erzielung optimaler Klebungen	322
12.5	Sicherheitsmaßnahmen bei der Verarbeitung von Klebstoffen	323
12.6	Kombinierte Fügeverfahren	323
12.6.1	Punktschweißkleben	324
12.6.1.1	Vorteile gegenüber reinen Punktschweißverbindungen	324
12.6.1.2	Vorteile gegenüber reinen Klebungen	324
12.6.1.3	Verfahrensdurchführung	324
12.6.1.4	Einfluß der Fügeleitwerkstoffe	325
12.6.2	Nieten – Kleben und Schrauben – Kleben	326
12.6.3	Falzen – Kleben	327
13	Anwendungen des Klebens	328
13.1	Allgemeine Betrachtungen	328
13.2	Kleben metallischer Werkstoffe	329
13.2.1	Allgemeine Betrachtungen	329
13.2.2	Klebarkeit wichtiger Metalle	329
13.2.2.1	Aluminium und Aluminiumlegierungen	329
13.2.2.2	Beryllium	330
13.2.2.3	Blei	330
13.2.2.4	Chrom, verchromte Werkstoffe	330
13.2.2.5	Edelmetalle	330
13.2.2.6	Kupfer	331
13.2.2.7	Magnesium	331
13.2.2.8	Messing	332
13.2.2.9	Nichtrostende Stähle, Edelstähle	332
13.2.2.10	Nickel, vernickelte Werkstoffe	332
13.2.2.11	Stähle, allgemeine Baustähle	332
13.2.2.12	Titan	332
13.2.2.13	Zink, verzinkte Stähle	333
13.2.3	Kleben von Metallkombinationen	334
13.2.4	Kleben lackierter Bleche	335
13.3	Kleben der Kunststoffe	335
13.3.1	Grundlagen	335
13.3.2	Oberflächenbehandlung	341
13.3.3	Klebstoffe für Kunststoffe	344
13.3.3.1	Lösungsmittelklebstoffe	344

13.3.3.2	Diffusionsklebung	344
13.3.3.3	Reaktionsklebstoffe	345
13.3.4	Klebarkeit wichtiger Kunststoffe	345
13.3.4.1	Polyethylen	345
13.3.4.2	Polypropylen	346
13.3.4.3	Polytetrafluorethylen	346
13.3.4.4	Polyamide	346
13.3.4.5	Phenol-Formaldehydharze	346
13.3.4.6	Polycarbonate	346
13.3.4.7	Polymethylmethacrylat (Arcylglas)	347
13.3.4.8	Polyvinylchlorid	347
13.3.4.9	Polystyrol	347
13.3.4.10	Polyoxymethylen (Polyacetale)	348
13.3.4.11	Polyethylenterephthalat	348
13.3.4.12	Polyurethanschaum	348
13.3.4.13	Faserverstärkte Kunststoffe	348
13.3.5	Kleben von Kunststoffen mit Metallen	349
13.3.6	Festigkeit und konstruktive Gestaltung von Kunststoffklebungen	350
13.4	Kleben von Glas	351
13.4.1	Grundlagen	351
13.4.2	Oberflächenbehandlung	353
13.4.3	Klebstoffe	353
13.4.4	Kleben von Glas mit Metallen	353
13.5	Kleben von Gummi	353
13.5.1	Gummi/Gummi-Klebung	354
13.5.1.1	Klebstoffe	354
13.5.1.2	Oberflächenvorbehandlung vulkanisierter Kautschuktypen	354
13.5.1.3	Bindung unvulkanisierter Kautschuktypen	355
13.5.2	Gummi/Metall-Bindung	355
13.5.2.1	Vernetzung mittels Resorzin-Formaldehyd	355
13.5.2.2	Vernetzung durch Polyisocyanate	356
13.6	Kleben von Holz	357
13.6.1	Allgemeine Betrachtungen	357
13.6.2	Klebstoffe	357
13.7	Kleben poröser Werkstoffe	358
13.8	Anwendungen des Klebens bei Reparaturen	359
14	Prüfung von Klebungen	361
14.1	Allgemeine Betrachtungen	361
14.2	Zerstörende Prüfverfahren	362
14.2.1	Prüfverfahren für statische Kurzzeitbeanspruchungen	363
14.2.1.1	Beanspruchung auf Zugscherung	363
14.2.1.2	Beanspruchung auf Schub	363
14.2.1.3	Beanspruchung auf Zug	365
14.2.1.4	Beanspruchung auf Druckscherung	365
14.2.1.5	Beanspruchung auf Torsion	365

14.2.1.6	Beanspruchung auf Schälung	366
14.2.2	Prüfverfahren für statische und dynamische Langzeitbeanspruchungen	369
14.2.2.1	Prüfung der Zeitstandfestigkeit	369
14.2.2.2	Prüfung der Dauerschwingfestigkeit	369
14.2.2.3	Abkürzungsverfahren für Langzeitbeanspruchungen	369
14.2.3	Prüfung bei schlagartiger Beanspruchung	370
14.2.4	Prüfung bei besonderen Umweltbedingungen	371
14.2.5	Prüfung mittels Schallemissionsanalyse	371
14.3	Zerstörungsfreie Prüfverfahren	372
14.3.1	Akustische Verfahren auf Basis Ultraschall	373
14.3.1.1	Resonanzverfahren	373
14.3.1.2	Impuls-Echo-Verfahren	373
14.3.1.3	Durchschallungsverfahren	374
14.3.2	Elektrische Verfahren	374
14.3.3	Thermische Verfahren	374
14.3.4	Strahlungsverfahren	375
14.3.5	Holographische Verfahren	375
14.4	Prüfung von Klebschichtpolymeren	375
15	Anhang	377
15.1	Verzeichnis der erwähnten DIN-Normen	377
15.2	Verzeichnis wichtiger ASTM-Methoden und Empfehlungen für die Prüfung von Klebstoffen und Klebungen	378
15.3	Kurzzeichen für Klebstoffgrundstoffe und wichtige Kunststoffe (nach DIN 7728 Teil 1)	379
15.4	Ausgewählte deutsch-englische und englisch-deutsche Begriffe aus dem Gebiet des Klebens	380
	Literaturverzeichnis	388
	Sachverzeichnis	417