
Inhalt

Vorwort	V
1 Einführung	1
2 Das physikalische Verhalten der Kunststoffe	5
2.1 Zustandsdiagramm amorpher Thermoplaste	5
2.2 Zustandsdiagramm teilkristalliner Thermoplaste	7
2.3 Zustandsdiagramm vernetzter Duroplaste	9
2.4 Mechanische Eigenschaften im festen Zustand	10
2.4.1 Elastische Verformung	10
2.4.2 Lineare viskoelastische Verformung	10
2.4.3 Zeitabhängige viskose Verformung	14
2.4.3.1 Zügige einachsige Zugbeanspruchung	14
2.4.3.2 Einachsige langzeitige statische Zugbeanspruchung	19
2.5 Festkörper-Reibung	21
2.6 Rheologisches Werkstoffverhalten	22
2.6.1 Scherviskosität	22
2.6.2 Dehnviskosität	26
2.7 Thermodynamische Zustandsänderungen und Zustandsgrößen	28
2.7.1 Thermische Zustandseigenschaften	28
2.7.2 Kalorische Zustandseigenschaften	30
2.7.3 Leitungseigenschaften	33
2.8 Akustische Eigenschaften	34
2.9 Elektrische Eigenschaften	37
3 Adhäsion	41
3.1 Adhäsionsarten	41
3.2 Zwischenmolekulare und zwischenatomare Wechselwirkungen	41
3.3 Thermodynamik der Oberflächen	43
3.3.1 Oberflächenenergie, Adhäsionsarbeit und Kohäsionsenergie	43
3.3.2 Gleichgewichtsbedingungen	44
3.3.3 Grenzflächenenergie	46
3.3.4 Gleichungen zur Bestimmung der Grenzflächenspannung	48
3.3.4.1 Zweiparametergleichungen	48
3.3.4.2 Vierparametergleichungen	50
3.3.4.3 Sechsparametergleichungen	51
3.4 Adhäsionsbedingungen auf der Basis der Oberflächenenergien	52
3.5 Experimentelle und theoretische Korrelationen zwischen Haftfestigkeiten und oberflächenenergetischen Größen	54
3.5.1 Zweiparametrische Grenzflächenenergiegleichungen	54
3.6 Experimentelle und theoretische Korrelationen	54

3.6.1	Vierparametrische Grenzflächenenergiegleichungen	57
3.7	Diffusion	60
3.7.1	Modell auf Basis der Einstein-Gleichung	60
3.7.2	Reptationmodell	62
3.7.3	Platzwechselfvorgänge aufgrund von Molekülver Streckung und Relaxation	70
3.7.4	Diffusion an der Grenzfläche inkompatibler Systeme	74
3.8	Mechanische Adhäsion	74
4	Wärmeübertragung und Strömungsmechanik	79
4.1	Wärmeübertragung	79
4.1.1	Differentialgleichung	79
4.1.2	Rand- und Anfangsbedingungen	79
4.1.3	Schmelzen	80
4.1.4	Schmelzeschichtdickenberechnung mit Hilfe der effektiven Temperaturleitfähigkeit	84
4.1.4.1	Randbedingung: Konstante Wandtemperatur, halbumendlicher Raum	84
4.1.4.2	Randbedingung: Konstanter Wärmestrom, halbumendlicher Raum	87
4.1.4.3	Randbedingung: Konvektiver Wärmeübergang, halbumendlicher Raum	88
4.1.4.4	Randbedingung: Strahlungswärmeübergang, halbumendlicher Raum	89
4.1.4.5	Randbedingung: Äußere Reibung, halbumendlicher Raum	89
4.1.5	Gekoppelte Systeme	90
4.1.5.1	Grenzfläche Festkörper/Festkörper	90
4.1.5.2	Grenzfläche Festkörper/strömendes gasförmiges oder flüssiges Medium	92
4.1.6	Wärmeübertragung an bewegten Oberflächen	93
4.1.7	Wärmeübertragung mit inneren Wärmequellen	93
4.1.7.1	Differentialgleichung	93
4.1.7.2	Wärmequellentherme	93
4.1.7.3	Lösungen der Differentialgleichung mit Wärmequellen- termen	95
4.1.8	Wärmeübertragung mit Wärmequellen, die künstlich in den zu erwärmenden Kunststoff eingebracht wurden	97
4.1.8.1	Stationäre punktförmige Wärmequellen	97
4.1.8.2	Stationäre linienförmige Wärmequelle	97
4.2	Strömungsmechanik	99
4.2.1	Quetschfließen zwischen zwei parallelen Kreisscheiben	99
4.2.2	Quetschfließen zwischen zwei parallelen Rechteckplatten	101
4.3	Stationäre Wärmeübertragung und Fließprozesse	102
4.3.1	Quetschfließen bei gleichzeitiger Wärmeleitung	102
4.3.2	Quetschfließen unter Berücksichtigung von Wärmeleitung und Dissipation im Schmelzefilm	105

5	Schweißen	109
5.1	Schweißverfahren	109
5.2	Wärmekontaktschweißverfahren	110
5.2.1	Heizelementschweißen	110
5.2.1.1	Einordnung des Verfahrens und Anwendungsgebiete	110
5.2.1.2	Normaltemperaturschweißen	110
5.2.1.3	Hochtemperaturschweißen	125
5.2.1.4	Schweißen gefüllter Materialien	127
5.2.1.5	Schweißen von Materialien mit sehr niedriger Viskosität	131
5.2.1.6	Einfluss von Feuchtigkeit auf die Schweißnahtfestigkeit	131
5.2.1.7	Schweißen von Thermoplasten mit unterschiedlichen rheologischen und thermischen Eigenschaften	131
5.2.1.8	Schweißen unterschiedlicher Thermoplaste	135
5.2.1.9	Schweißen von vernetztem Polyethylen (PE-X) [40]	136
5.2.1.10	Schweißnahtgefügestruktur bei teilkristallinen Thermoplasten	138
5.2.1.11	Scale-up-Regeln	139
5.2.1.12	Besonderheiten bei Rohrschweißungen	143
5.2.1.13	Eigenspannungen	144
5.2.2	Wärmekontaktschweißen	147
5.2.3	Wärmeimpulsschweißen	153
5.2.4	Sonderausführungen des Wärmekontakt- und des Wärmeimpulsverfahrens	157
5.2.5	Heizkeilschweißen	159
5.2.5.1	Erwärmung mit metallischem Heizkeil	159
5.2.5.2	Heißlufterwärmung	161
5.2.5.3	Nahtfestigkeit	163
5.2.5.4	Kriterien für die Heizkeilschweißnaht	165
5.3	Schweißen durch Bewegung	166
5.3.1	Ultraschallschweißen	166
5.3.1.1	Einordnung des Verfahrens, Anwendungsgebiete und Funktionsschema	166
5.3.1.2	Grundlagen	168
5.3.1.3	Fügeflächengeometrien	178
5.3.1.4	Schweißparameter und Nahtfestigkeit	181
5.3.1.5	Schweißen von Materialkombinationen	184
5.3.1.6	Ultraschallschweißen von Folien	187
5.3.1.7	Ultraschall-Punktschweißen	189
5.3.2	Vibrationsschweißen	190
5.3.2.1	Einordnung des Verfahrens	190
5.3.2.2	Druck- und Weg-Zeit-Verlauf	190
5.3.2.3	Feststoffreibphase	192
5.3.2.4	Instationäre und stationäre Schmelzefilmbildung	193
5.3.2.5	Abkühl-, Nachdruckphase	196
5.3.2.6	Resümee	196
5.3.2.7	Besonderheiten beim Vibrations- und Biaxialschweißen	196
5.3.2.8	Schweißparameter und Nahtfestigkeit	200

5.3.2.9	Fügen von verstärkten Materialien	201
5.3.2.10	Wassergehalt	201
5.4	Erwärmung im elektromagnetischen Feld	202
5.4.1	Einordnung der Verfahren	202
5.4.2	Hochfrequenzschweißen	202
5.4.2.1	Erwärmungsprinzip	202
5.4.2.2	Nahtgestaltung	207
5.4.2.3	Verwendbare Materialien	208
5.4.3	Mikrowellenschweißen	208
5.4.4	Induktionsschweißen	210
5.5	Erwärmen mit Hilfe von Strahlung	212
5.5.1	Strahlung	212
5.5.2	Laserstumpfschweißen	217
5.5.2.1	Verfahrensablauf und maschinentechnische Umsetzung des Laserstumpfschweißens	217
5.5.2.2	Temperaturentwicklung und Schmelzeschichtdicke in der Fügezone	219
5.5.2.3	Festigkeit	223
5.5.3	Durchstrahlschweißen	225
5.5.3.1	Verfahrensvarianten	225
5.5.3.2	Temperaturentwicklung und Schmelzeschichtdicke	227
5.5.3.3	Festigkeit	229
5.5.4	Heizstrahlerstumpfschweißen	232
5.6	Erwärmung durch Konvektion	233
5.6.1	Einordnung der Verfahren	233
5.6.2	Extrusionsschweißen	233
5.6.2.1	Verfahrensvarianten und Verfahrensablauf	233
5.6.2.2	Temperaturentwicklung und Schmelzschichtdicke in der Fügezone	234
5.6.2.3	Schweißparameter und Nahtfestigkeit	239
5.6.3	Warmgasschweißen	242
5.7	Erwärmung mit einem elektrischen Widerstandsdraht (Heizwendel- schweißen)	244
5.8	Prüfen von Schweißverbindungen	245
5.8.1	Prüfen von Rohmaterial und Halbzeug (einschließlich Formteile und Folie)	245
5.8.2	Prüfung der Nahtqualität geschweißter Halbzeuge und Formteile	246
5.8.3	Schweißnahtqualitätsprüfung von Folien und beschichteten Gewebe	250
6	Kleben	261
6.1	Einleitung	261
6.2	Arten der Klebstoffe	261
6.2.1	Chemisch abbindende Klebstoffe	262
6.2.2	Physikalisch abbindende Klebstoffe	263
6.2.3	Nichtabbindende Klebstoffe (Haftklebstoffe)	264
6.3	Klebeigenschaften von Kunststoffen	264

6.4	Verfahrenstechnik	268
6.4.1	Vorbehandlung des Fügeteils	268
6.4.1.1	Reinigen	268
6.4.1.2	Aufräuen	269
6.4.1.3	Chemische Vorbehandlung	269
6.4.1.4	Thermische Vorbehandlung	271
6.4.1.5	Korona-Entladung	272
6.4.1.6	Traver-Verfahren	274
6.4.1.7	Niederdruckplasmabehandlung	274
6.4.1.8	Ionenätzen	276
6.4.1.9	Haftvermittler (Primer)	276
6.4.2	Klebstoffvorbereitung	276
6.4.2.1	Mischen	276
6.4.2.2	Einstellung der Viskosität	280
6.4.3	Klebstoffauftrag	281
6.4.4	Ablüften und Anlösen	284
6.4.5	Fügen und Fixieren	287
6.4.6	Abbinden des Klebstoffs	289
6.4.6.1	Chemische Abbindung	290
6.4.6.2	Physikalisches Abbinden	292
6.5	Klebnahtgestaltung	293
6.6	Klebnahtfestigkeit	296
6.7	Einfache Berechnungsansätze	297
7	Mechanische Verbindungen	303
7.1	Schnappverbindungen	303
7.1.1	Einleitung	303
7.1.2	Grundformen der Schnappverbindungen	303
7.1.3	Berechnungsgrundlagen	304
7.1.3.1	Fügekraft	304
7.1.3.2	Querkraft	305
7.1.3.3	Belastbarkeit der Schnappverbindungen	315
7.1.4	Stoffwerte	315
7.2	Pressverbindungen	318
7.2.1	Einleitung	318
7.2.2	Berechnungsgrundlagen	318
7.2.2.1	Drehmoment, Axialkraft, Fügedruck, Spannungen	318
7.2.3	Übermaß	320
7.2.3.1	Allgemeine Formulierung	320
7.2.3.2	Metallwelle/Kunststoffnabe	321
7.2.3.3	Kunststoffbuchse/Metallgehäuse	322
7.2.4	Stoffwerte	324
7.3	Schrauben	325
7.3.1	Einleitung	325
7.3.2	Verbindungen mit angeformten Gewinden	325
7.3.2.1	Feste Verbindungen	325
7.3.2.2	Bewegliche Verbindungen	329

7.3.2.3	Spannungsverteilung innerhalb des vom Außengewinde überdeckten Innengewindes	329
7.3.3	Gewindeformende Schrauben	330
7.3.3.1	Allgemeines	330
7.3.3.2	Einschraubaugen (Tubus)	330
7.3.3.3	Berechnung von Kenngrößen der Verbindung	331
7.3.4	Verbindung mit metrischen Schrauben	332
7.3.4.1	Verbindung mit Schraube und Mutter	332
7.3.4.2	Verbindung mit im Kunststoff verankerten Gewindebolzen	333
7.3.4.3	Verbindung mit im Kunststoff verankerten Gewindeeinsätzen	334
7.4	Nieten von Kunststoffteilen	335
7.4.1	Einleitung	335
7.4.2	Ultraschallnieten	335
7.4.2.1	Prozess	335
7.4.2.2	Nietzapfengestaltung	335
7.4.2.3	Nietkopfformen	337
7.4.2.4	Werkstoffe	337
7.4.3	Kaltnieten	337
7.4.4	Warmnieten	339
7.4.5	Kombinationsnieten	339
7.4.6	Schnappnieten	339
Register	345