

Amodel®



**SOLVAY**

asking more from chemistry®

# Amodel® PPA

Technisches Handbuch

**SPECIALTY  
POLYMERS**



<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>	Kriechverhalten .....	31
<b>Amodel-Polyphthalamid (PPA)</b> .....	<b>1</b>	Zug-Kriechverhalten .....	32
<b>Chemie</b> .....	<b>1</b>	Isochrone Spannungs-Dehnungs-Diagramme .....	34
Kristallinität .....	2	Kriechbruch unter Zugbelastung .....	34
Auswirkungen von Feuchtigkeit .....	3	Biege-Kriechverhalten .....	35
<b>Produktdaten</b> .....	<b>4</b>	Druck-Kriechverhalten .....	36
<b>Amodel-Polymer –</b>		Ermüdungsfestigkeit .....	36
<b>Tabellen mit typischen Eigenschaften</b> .....	<b>4</b>	Ermüdungsfestigkeit von Amodel-Polymeren .....	37
Nomenklatur .....	5	Auswirkungen von Feuchtigkeit .....	38
Produktauswahl .....	5	Bedeutung der Feuchtigkeitsaufnahme .....	38
<b>Eigenschaften</b> .....	<b>6</b>	Feuchtigkeitsaufnahme und	
<b>Typische Eigenschaften</b> .....	<b>6</b>	Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) .....	38
<b>Beschleunigte Feuchtigkeitsaufnahme</b> .....	<b>6</b>	Aufnahmemenge .....	39
<b>Mechanische Eigenschaften</b> .....	<b>19</b>	Auswirkung von Feuchtigkeit auf Festigkeit	
Mechanische Kurzzeiteigenschaften .....	19	und Steifigkeit .....	39
Zugeigenschaften .....	19	Dimensionsänderung aufgrund von	
Prüfmethoden .....	19	Feuchtigkeitsaufnahme .....	40
Vergleich von Zugeigenschaften .....	21	Dimensionsänderung im Vergleich zu PA 6,6 .....	41
Zugeigenschaften von GF-PPA in Abhängigkeit		<b>Thermische Eigenschaften</b> .....	<b>42</b>
von der Temperatur .....	21	Wärmeformbeständigkeit (HDT) .....	42
Zugeigenschaften von GF-A-1000-Typen		Wärmeformbeständigkeitswerte	
bei hohen Temperaturen .....	22	von Amodel-Polymeren .....	43
Biegeeigenschaften .....	23	Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient (CLTE) .....	43
Prüfmethoden .....	23	Wärmeleitfähigkeit .....	45
Vergleich von Biegeeigenschaften .....	24	Spezifische Wärme .....	46
Biegeeigenschaften bei hohen Temperaturen .....	24	Thermische Stabilität .....	47
Scherverhalten .....	26	Thermogravimetrische Analyse (TGA) .....	47
Druckfestigkeit und Druckmodul .....	27	Wärmealterung .....	47
Schlagzähigkeit .....	27	Relativer Temperaturindex (UL) .....	48
Izod-Schlagzähigkeit (einseitig eingespannter		Brandeigenschaften .....	50
Balken) .....	28	Glühdrahttest .....	50
Vergleich der Izod-Schlagzähigkeit .....	28	Rauchdichtetest (NBS) .....	51
Charpy-Schlagzähigkeit (gelagerter Balken) .....	29	Vertikale Entflammbarkeit nach UL 94 .....	51
Falltest-Stoßverhalten .....	30	Horizontaler Flammtest .....	51
Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl) .....	30	Vertikaler 50-W-Flammtest (20 mm) .....	51
Mechanische Langzeiteigenschaften .....	31	Vertikaler Flammtest (500 W) .....	52

## **Elektrische Eigenschaften ..... 53**

Dielektrische Durchschlagspannung und Durchschlagfestigkeit (ASTM D149) .....	53
Spezifischer Durchgangswiderstand (ASTM D257) .....	53
Oberflächenwiderstand (ASTM D257) .....	53
Dielektrizitätskonstante (ASTM D150) .....	54
Dielektrischer Verlustfaktor (ASTM D150) .....	54
UL 746A: Elektrische Kurzzeiteigenschaften .....	54
Dry Arc Resistance (ASTM D495) .....	55
Comparative Tracking Index (CTI) (ASTM D3638) .....	55
High Voltage Arc Tracking Rate (HVTR) .....	55
Hot Wire Ignition (HWI) (ASTM D3874) .....	56
High Current Arc Ignition (HAI) .....	56
High-Voltage Arc Resistance to Ignition .....	56
Eigenschaften von Amodel-Polymeren nach UL 746A ..	57
Relative Temperaturindizes nach UL .....	57

## **Beständigkeit gegen Umgebungseinflüsse ..... 58**

Chemikalienbeständigkeit .....	58
Chemikalienverträglichkeit .....	62
Gammastrahlung .....	62

## **Konstruktionsinformationen ..... 63**

### **Mechanische Konstruktionsfaktoren ..... 64**

#### **Anwendung klassischer Spannungs-Dehnungs-Formeln ..... 67**

Grenzen der Konstruktionsberechnungen .....	67
Durchbiegungsberechnungen .....	67
Spannungsberechnungen .....	67
Berücksichtigung der Verstärkungsfaserorientierung ..	67
Konstruktion von Teilen mit gleicher Steifigkeit .....	68
Änderung der Wanddicke .....	68
Verwendung von Rippen zur Beibehaltung der Steifigkeit .....	68
Berechnung für Dauerbelastung .....	69
Berechnung der Durchbiegung .....	69
Berechnung der zulässigen Spannung – Kriechbruch ..	70

#### **Berücksichtigung von Spannungskonzentrationen ..... 71**

#### **Berücksichtigung von thermischen Spannungen .. 71**

Verlust der Schraubverbindungsfestigkeit durch Kriechen .....	72
---	----

## **Konstruktion für die Montage ..... 73**

Presspassungen .....	73
Berechnung des zulässigen Übermaßes .....	73
Mechanische Verbindungselemente .....	74
Blechschrauben .....	74
Verbesserung der Anzugsmoment-Beibehaltung ....	74
Anzugsmoment .....	75
Berechnung der Ausreißkraft .....	75
Gewindeeinsätze .....	75
Umspritzte Gewinde .....	76
Konstruktion mit Schnappverbindungen .....	76
Formel für einen geraden, einseitig eingespannten Balken .....	76
Formel für einen verjüngten, einseitig eingespannten Balken .....	77

## **Spritzgussgerechte Konstruktion ..... 78**

Wanddicke .....	78
Wanddickenänderung .....	78
Entformungswinkel .....	78
Rippen .....	79
Verwendung von Kernen .....	79
Nocken .....	79
Hinterschneidungen .....	80

## **Nachbearbeitung ..... 81**

### **Schweißen ..... 81**

Heizelementschweißen .....	81
Vibrationsschweißen .....	81
Rotationsschweißen .....	82
Ultraschallschweißen .....	83

### **Kleben ..... 83**

### **Beschichtungen und Oberflächenbehandlungen... 84**

Vakuumbedampfen .....	84
Laserbeschriften .....	85
Tintenstrahldruck .....	85
Lackieren .....	85
Umspritzen .....	85

## **Index ..... 87**

## Tabellen

Tabelle 1: Eigenschaften von Amodel-PPA-Grundpolymer. . . . .	1	Tabelle 26: UL-Kriterien zur Klassifizierung von Werkstoffen 5VA bzw. 5VB. . . . .	52
Tabelle 2: Nomenklatorsystem für Amodel-Polymere. . . . .	4	Tabelle 27: UL 94-Klassifizierungen von Amodel-PPA-Typen . . . . .	52
Tabelle 3: Relative Einstufung ausgewählter Eigenschaften wichtiger Amodel-PPA-Typen . . . . .	5	Tabelle 28: Durchschlagfestigkeit ausgewählter Amodel-Typen. . . . .	53
Tabelle 4: Glasfaserverstärkte Typen – mechanische Eigenschaften (US-Einheiten). . . . .	7	Tabelle 29: Spezifischer Durchgangswiderstand und Oberflächenwiderstand von Amodel-Polymeren . . . . .	54
Tabelle 5: Glasfaserverstärkte Typen – mechanische Eigenschaften (SI-Einheiten) . . . . .	8	Tabelle 30: Dielektrizitätskonstante von Amodel-Polymeren . . . . .	54
Tabelle 6: Glasfaserverstärkte Typen – thermische, elektrische und allgemeine Eigenschaften . . . . .	9	Tabelle 31: Dielektrischer Verlustfaktor von Amodel-Polymeren . . . . .	55
Tabelle 7: Schlagzähmodifizierte Typen – mechanische Eigenschaften (US-Einheiten). . . . .	10	Tabelle 32: Dry Arc Resistance (ASTM D495) PLC-Einstufung. . . . .	55
Tabelle 8: Schlagzähmodifizierte Typen – mechanische Eigenschaften (SI-Einheiten) . . . . .	11	Tabelle 33: Comparative Tracking Index PLC-Einstufung. . . . .	55
Tabelle 9: Schlagzähmodifizierte Typen – thermische, elektrische und allgemeine Eigenschaften . . . . .	12	Tabelle 34: High Voltage Arc Tracking Rate PLC-Einstufung. . . . .	56
Tabelle 10: Schlagzähmodifizierte, glasfaserverstärkte und flammhemmende Typen – mechanische Eigenschaften (US-Einheiten). . . . .	13	Tabelle 35: Hot Wire Ignition PLC-Einstufung . . . . .	56
Tabelle 11: Schlagzähmodifizierte, glasfaserverstärkte und flammhemmende Typen – mechanische Eigenschaften (SI-Einheiten) . . . . .	14	Tabelle 36: High Current Arc Ignition PLC-Einstufung . . . . .	56
Tabelle 12: Schlagzähmodifizierte, glasfaserverstärkte und flammhemmende Typen – thermische, elektrische und allgemeine Eigenschaften . . . . .	15	Tabelle 37: High Voltage Arc Resistance to Ignition PLC-Einstufung. . . . .	56
Tabelle 13: Mineral- und mineral-/glasfaserverstärkte Typen – mechanische Eigenschaften (US-Einheiten). . . . .	16	Tabelle 38: PLC-Einstufungen nach UL 746A für Amodel-PPA-Typen . . . . .	57
Tabelle 14: Mineral- und mineral-/glasfaserverstärkte Typen – mechanische Eigenschaften (SI-Einheiten). . . . .	17	Tabelle 39: Legende zur Einstufung der Chemikalienbeständigkeit . . . . .	58
Tabelle 15: Mineral- und mineral-/glasfaserverstärkte Typen – thermische, elektrische und allgemeine Eigenschaften . . . . .	18	Tabelle 40: Eignungstests der Chemikalienbeständigkeit – organische Chemikalien . . . . .	59
Tabelle 16: Probekörperabmessungen für Izod-Schlagzähigkeit. . . . .	28	Tabelle 41: Eignungstests der Chemikalienbeständigkeit – wässrige Chemikalienlösungen . . . . .	60
Tabelle 17: Durchstoßverhalten (ASTM D3763) von schlagzähmodifiziertem PPA. . . . .	30	Tabelle 42: Eignungstests der Chemikalienbeständigkeit – Flüssigkeiten aus dem Transportwesen. . . . .	61
Tabelle 18: Poisson-Zahl für Amodel-Produkte . . . . .	31	Tabelle 43: Allgemeine Richtwerte zur Chemikalienverträglichkeit von Amodel-PPA-Polymeren. . . . .	62
Tabelle 19: Lineare Wärmeausdehnungskoeffizienten . . . . .	44	Tabelle 44: Auswirkung von Gammastrahlung auf Amodel AS-1133 HS. . . . .	62
Tabelle 20: Wärmeleitfähigkeit von Amodel-PPA-Polymeren. . . . .	45	Tabelle 45: Konstruktionsvorteile von Amodel-Polymer gegenüber Metallen . . . . .	63
Tabelle 21: Relative Temperaturindizes von Amodel-PPA-Typen. . . . .	49	Tabelle 46: Formeln für maximale Spannung und Durchbiegung . . . . .	65
Tabelle 22: UL-Definitionen von GWIT und GWFT . . . . .	50	Tabelle 47: Flächen- und Momentformeln für ausgewählte Querschnitte . . . . .	66
Tabelle 23: Ergebnisse der Glühdrahttests . . . . .	50	Tabelle 48: Dehnungsempfehlungen für Rasthaken-Schnappverbindungen . . . . .	77
Tabelle 24: Rauchdichte . . . . .	51	Tabelle 49: Geeignete Kfz-Grundierungen. . . . .	84
Tabelle 25: UL-Kriterien zur Klassifizierung von Werkstoffen als V-0, V-1 oder V-2. . . . .	52	Tabelle 50: Anbieter von Laserbeschriftungsgeräten . . . . .	84
		Tabelle 51: Anbieter von Tintenstrahl-Druckgeräten . . . . .	85

## Abbildungen

Abbildung 1: Temperaturabhängige Moduländerungen . . .	2
Abbildung 2: Modul von Amodel-Grundpolymeren in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	2
Abbildung 3: Auswirkung von Feuchtigkeit auf $T_g$ . . . . .	3
Abbildung 4: Dimensionsänderung in Abhängigkeit von der Eintauchzeit in Wasser. . . . .	3
Abbildung 5: Typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Amodel ET-1000. . . . .	19
Abbildung 6: Typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Amodel A-1933 . . . . .	20
Abbildung 7: Sekanten- und Tangentenmethode zum Abschätzen des Moduls. . . . .	20
Abbildung 8: Zugfestigkeit von Polymeren mit 30–33 % GF. . . . .	20
Abbildung 9: Zugmodul von Polymeren mit 30–33 % GF. . . . .	20
Abbildung 10: Zugdehnung von Polymeren mit 30–33 % GF. . . . .	21
Abbildung 11: Zugfestigkeit von PPA mit 33 % GF in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	21
Abbildung 12: Zugmodul von PPA mit 33 % GF in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	21
Abbildung 13: Zugdehnung von PPA mit 33 % GF in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	21
Abbildung 14: Zugfestigkeit von GF-A-1000-PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	22
Abbildung 15: Zugmodul von GF-A-1000-PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	22
Abbildung 16: Zugdehnung von GF-A-1000-PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	22
Abbildung 17: Zugfestigkeit von mineral-/ glasfaserverstärkten PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	22
Abbildung 18: Zugmodul von mineral-/ glasfaserverstärkten PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	23
Abbildung 19: Biegefestigkeit von Polymeren mit 30–33 % GF. . . . .	24
Abbildung 20: Biegemodul von Polymeren mit 30–33 % GF. . . . .	24
Abbildung 21: Biegefestigkeit von GF-PPA-Polymeren in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	24
Abbildung 22: Biegemodul von GF-PPA-Polymeren in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	24
Abbildung 23: Biegefestigkeit von GF-A-1000-PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	25
Abbildung 24: Biegemodul von GF-A-1000-PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	25
Abbildung 25: Biegefestigkeit von mineral-/ glasfaserverstärkten PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	25

Abbildung 26: Biegemodul von mineral-/ glasfaserverstärkten PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	25
Abbildung 27: Scherfestigkeit von Polymeren mit 30–33 % GF. . . . .	26
Abbildung 28: Druckfestigkeit von Polymeren mit 30–33 % GF. . . . .	27
Abbildung 29: Druckfestigkeit von A-1000-Polymeren in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	27
Abbildung 30: Druckmodul von A-1000-Polymeren in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	27
Abbildung 31: Probekörper für Izod-Schlagzähigkeit. . . . .	28
Abbildung 32: Izod-Schlagzähigkeit von Polymeren mit 30– 33 % GF (ASTM D256) . . . . .	28
Abbildung 33: Izod-Schlagzähigkeit von Amodel ET-1000 im Vergleich mit PA und PC . . . . .	29
Abbildung 34: Kerbempfindlichkeit von ET-1000 HS und PC . . . . .	29
Abbildung 35: Izod-Schlagzähigkeit von Amodel-PPA bei tiefen Temperaturen . . . . .	29
Abbildung 36: Probekörper für den Charpy- Schlagzähigkeitstest . . . . .	29
Abbildung 37: Charpy-Kerbschlagzähigkeit von Polymeren mit 30–33 % GF. . . . .	30
Abbildung 38: Scheinmodul bei 23 °C und 13,8 MPa. . . . .	33
Abbildung 39: Scheinmodul bei 23 °C und 34,5 MPa. . . . .	33
Abbildung 40: Scheinmodul bei 125 °C und 13,8 MPa. . . . .	33
Abbildung 41: Scheinmodul bei 125 °C und 34,5 MPa. . . . .	33
Abbildung 42: Scheinmodul bei 175 °C und 13,8 MPa. . . . .	33
Abbildung 43: Scheinmodul bei 175 °C und 34,5 MPa. . . . .	33
Abbildung 44: Isochrones Spannungs-Dehnungs- Diagramm für A-1133 HS PPA. . . . .	34
Abbildung 45: Isochrones Spannungs-Dehnungs- Diagramm für A-1145 HS PPA. . . . .	34
Abbildung 46: Kriechbruch unter Zugbelastung für AS-1133 HS . . . . .	35
Abbildung 47: Biege-Scheinmodul bei 69 MPa und 23 °C . . . . .	35
Abbildung 48: Biege-Scheinmodul bei 14 MPa und 83 °C . . . . .	35
Abbildung 49: Druck-Scheinmodul von AS-1133 HS . . . . .	36
Abbildung 50: Biegeermüdung von GF-Polymeren bei 23 °C und 32 Hz . . . . .	37
Abbildung 51: Biegeermüdung von AS-1145 bei hoher Temperatur. . . . .	37
Abbildung 52: Feuchtigkeitsaufnahme von GF-Polymeren . . . . .	39
Abbildung 53: Auswirkung von Feuchtigkeit auf die Zugfestigkeit von GF-Polymeren . . . . .	40



Abbildung 54: Auswirkung von Feuchtigkeit auf den Biegemodul von GF-Polymeren . . . . .	40	Abbildung 81: Proportionalitätskonstante (K) für einen sich verjüngenden Balken . . . . .	77
Abbildung 55: Dimensionsänderung von 33-%-GF-PPA . . . . .	40	Abbildung 82: Wanddickenübergang . . . . .	78
Abbildung 56: Dimensionsänderung von PPA mit 40 % Mineralverstärkung . . . . .	41	Abbildung 83: Entformungsschräge als Entformungshilfe . . . . .	78
Abbildung 57: Dimensionsvergleich von GF-PA 6,6 und GF-PPA bei 100 % RL . . . . .	41	Abbildung 84: Entformungsschräge – Empfehlungen für Rippenkonstruktion . . . . .	79
Abbildung 58: Auswirkungen von Werkzeugtemperatur und Temperung auf die HDT von Amodel AS-1133 HS . . . . .	42	Abbildung 85: Allgemeine Richtlinien für die Konstruktion von Nocken. . . . .	80
Abbildung 59: HDT von Polymeren mit 30–33 % GF. . . . .	43	Abbildung 86: Thermostatgehäuse mit sichtbaren Wulsten . . . . .	80
Abbildung 60: Wärmeleitfähigkeit von glasfaserverstärktem Amodel-PPA . . . . .	45	Abbildung 87: Hinterschneidungsschema. . . . .	80
Abbildung 61: Amodel A-1000-PPA – spezifische Wärme in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	46	Abbildung 88: Fügestellen beim Heizelementschweißen . . . . .	81
Abbildung 62: Amodel A-4000 – spezifische Wärme in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	46	Abbildung 89: Konfiguration einer Überlappingsverbindung. . . . .	82
Abbildung 63: Amodel A-5000 – spezifische Wärme in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	46	Abbildung 90: Konfiguration einer Scherverbindung . . . . .	82
Abbildung 64: Amodel A-6000 – spezifische Wärme in Abhängigkeit von der Temperatur. . . . .	46	Abbildung 91: Typische energierichtende Verbindungskonfiguration. . . . .	83
Abbildung 65: Thermogravimetrische Analyse von A-1000 in Luft . . . . .	47	Abbildung 92: Zugscherfestigkeit der Klebeverbindung . . . . .	84
Abbildung 66: Wärmealterungsvergleich – Zugfestigkeit . . . . .	47	Abbildung 93: Schlagzähigkeit der Klebeverbindung (seitlich). . . . .	84
Abbildung 67: Wärmealterungsvergleich – Izod-Schlagzähigkeit . . . . .	48		
Abbildung 68: Verwendung von Rippen zur Erhöhung der Steifigkeit . . . . .	69		
Abbildung 69: Beispiel für einen einseitig eingespannten Balken unter Biegebelastung . . . . .	69		
Abbildung 70: Zug-Kriechbruch für Amodel A-1133 HS . . . . .	70		
Abbildung 71: Spannungskonzentrationsfaktor bei inneren Ecken . . . . .	71		
Abbildung 72: Beispiel für thermische Spannungen . . . . .	71		
Abbildung 73: Beibehaltung des Schraubenanzugsmoments . . . . .	72		
Abbildung 74: Konstruktion mit mechanischen Verbindungselementen. . . . .	74		
Abbildung 75: Nockenkonstruktion für Blechschrauben. . . . .	74		
Abbildung 76: Beim Eindrehen von Schrauben entstehendes Drehmoment . . . . .	75		
Abbildung 77: Nockenkonstruktion für Ultraschalleinsätze . . . . .	75		
Abbildung 78: Rasthaken-Schnappverbindung. . . . .	76		
Abbildung 79: Einseitig eingespannter Balken – Punktbelastung am freien Ende . . . . .	76		
Abbildung 80: Schnappverbindungsausführung mit einem sich verjüngenden Balken . . . . .	77		





## Amodel-Polyphthalamid (PPA)

Amodel-Polyphthalamid (PPA) wurde 1991 erstmals kommerzialisiert. Mit der Polyphthalamid-Polymerteknik können eine Vielzahl an verschiedenen Kunststoffen hergestellt werden – einschließlich teilkristalliner und amorpher Polymere. Seit 1991 wurden mehrere Grundpolymerformulierungen kommerzialisiert, um speziellen Anforderungen der Industrie Rechnung tragen zu können. Alle handelsüblichen Amodel-Produkte sind teilkristallin.

Die teilkristallinen Typen der Amodel-PPA-Polymere haben ausgezeichnete mechanische Eigenschaften, eine hervorragende Dimensionsstabilität und eine außergewöhnlich hohe thermische Belastbarkeit sowie gute Verarbeitungseigenschaften. Amodel schließt die Preis-/Leistungs-Lücke zwischen den technischen Massenkunststoffen mit mittlerer Leistung, wie etwa thermoplastisches Polyester und aliphatisches Polyamid, und den teuren Spezialthermoplasten für Kleinserien, wie etwa Polyetheretherketon (PEEK).

Das Amodel-Produktsortiment enthält weit über 100 verschiedene Typen. Jeder Typ verfügt über eine einzigartige Mischung von Eigenschaften, die für die jeweiligen Anwendungs- und Verarbeitungsanforderungen von grundlegender Bedeutung sind. Anwendungen für Amodel-PPA wurden in zahlreichen verschiedenen Branchen entwickelt, einschließlich Kfz-/Transportwesen, industrielle Ausstattungen, Wasserbehandlung und -transport, Telekommunikation, Elektrik/Elektronik, Beschichtungen und Verbundwerkstoffe sowie Lebensmittel und Konsumgüter.

Dieses Handbuch ist als benutzerfreundliches Nachschlagewerk für Konstrukteure und Verarbeiter vorgesehen, die an Amodel-PPA als Lösung für ihre Werkstoffanforderungen interessiert sind. Es enthält Materialeigenschaften für ausgewählte Typen des Sortiments sowie Empfehlungen zur Teilekonstruktion und zur Verarbeitung.

## Chemie

Amodel-Polymere gehören zu den allgemein als Polyamiden bekannten chemischen Verbindungen. Polyamide können durch die Reaktion einer difunktionellen organischen Säure mit einem difunktionellen Amin oder durch Selbstkondensation entweder einer  $\omega$ -Aminosäure oder eines Lactams hergestellt werden. Polyamide können aus zahlreichen verschiedenen Säuren und Aminen hergestellt werden und eine Reihe von Polyamiden ist kommerziell von Bedeutung.

**Tabelle 1: Eigenschaften von Amodel-PPA-Grundpolymeren**

Grund-polymer	T <sub>g</sub>		T <sub>m</sub>	
	°C	°F	°C	°F
A-1000	123	253	313	595
A-4000	100	212	325	617
A-5000	89	192	294	561
A-6000	88	190	310	590

Deshalb wurde eine Bezeichnungskonvention für Polyamide entwickelt. Danach wird das Polyamid gemäß der Zahl von Kohlenstoffatomen in den Monomeren benannt, wobei die Diaminkomponente an erster Stelle steht. So erhält ein aus Hexamethyldiamin und Adipinsäure hergestelltes Polyamid die Bezeichnung Polyamid 66 bzw. Nylon 66 und ein Polymer aus Hexamethyldiamin und Dodecandisäure die Bezeichnung Nylon 6,12.

Wenn statt einer aliphatischen Disäure eine aromatische Disäure verwendet wird, ändert sich die Nomenklatur entsprechend, damit die isomere Form der aromatischen Disäure berücksichtigt werden kann. Es kann der Begriff „Polyphthalamid“ verwendet werden, um diese Polymere von denen aus ausschließlich aliphatischen Rohstoffen bestehenden Polymeren zu unterscheiden.

Polyamid 6,T, das durch Kondensation von Hexamethyldiamin mit Terephthalsäure hergestellt wird, wird seit langem für seine hervorragende Dimensionsstabilität, geringe Feuchtigkeitsaufnahme, hohe Festigkeit und Temperaturbeständigkeit geschätzt. Das grundlegende Problem, das seine Vermarktung verhindert, besteht darin, dass sein hoher Kristallitschmelzpunkt von 370 °C über seiner thermischen Zersetzungstemperatur liegt. Es lässt sich daher nicht mit den meisten herkömmlichen thermoplastischen Verarbeitungsmethoden, wie etwa Spritzguss oder Extrusion, verarbeiten. Darüber hinaus komplizieren der Schmelzpunkt sowie andere Faktoren den Polymerisationsprozess.

Die Amodel-Produktfamilie der Polyphthalamid-Polymere (PPA), die aus patentierten Stoffzusammensetzungen bestehen, wird hergestellt, indem das Grundpolyamid 6,T durch Hinzufügen von Comonomeren modifiziert wird. Durch Variation der Menge und Art der Comonomere entsteht eine Polymer-Produktfamilie. Diese Polymere haben alle einen niedrigeren Schmelzpunkt als Polyamid 6,T und zeichnen sich durch schnelle Kristallisierung aus. Die thermischen Eigenschaften der Amodel-PPA-Grundpolymere sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Wenn diese Grundpolymere mit Mineralstoffen, Glasfasern und/oder anderen Compounding-Bestandteilen kombiniert werden, ergeben sich eine Vielzahl verschiedener Spritzguss-Compounds mit einem bestens ausgewogenen Verhältnis von Verarbeitungseigenschaften und thermischem/mechanischem Verhalten. Für Compounds mit dem Grundpolymer A-1000 werden öltemperierte Werkzeuge benötigt, aber alle Compounds der übrigen Grundpolymere können mit wassertemperierten Werkzeugen verarbeitet werden.

## Kristallinität

Thermoplaste werden häufig in zwei Kategorien eingeteilt – amorph und teilkristallin. Einer der Hauptunterschiede zwischen amorphen und teilkristallinen Polymeren besteht darin, wie sich ihre Eigenschaften mit der Temperatur ändern. Abbildung 1 zeigt einen typischen Verlauf des Moduls in Abhängigkeit von der Temperatur für amorphe und teilkristalline Polymere.

Wird die Temperatur erhöht, nimmt der Modul amorpher Polymere in der Regel langsam ab, bis die Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) erreicht wird. Bei Temperaturen über der  $T_g$  nimmt der Modul rasch ab. Daher werden amorphe Thermoplaste selten bei Temperaturen oberhalb ihrer Glasübergangstemperatur eingesetzt.

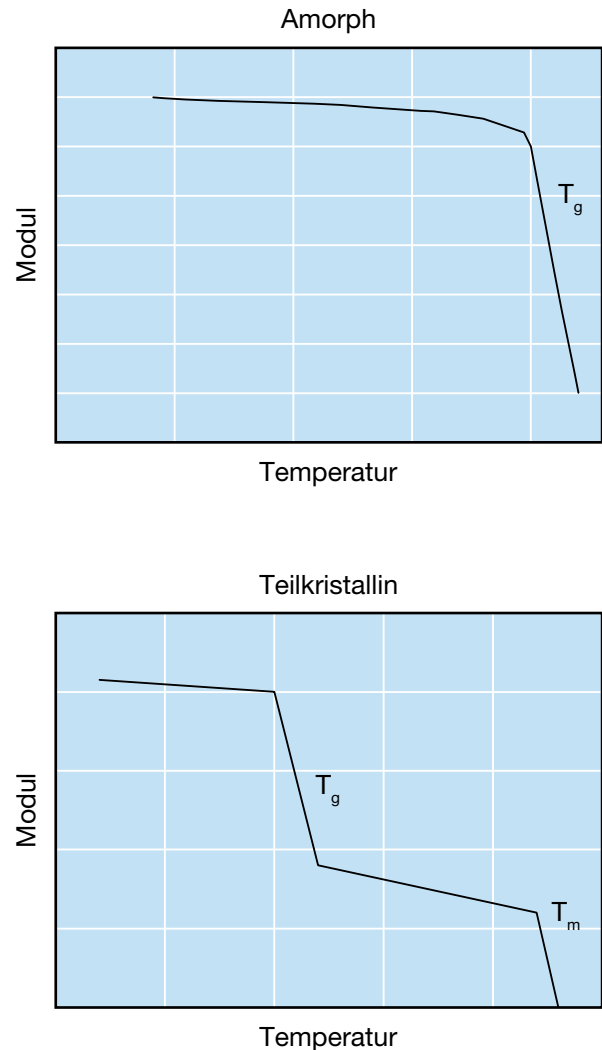
Bei teilkristallinen Polymeren nimmt der Modul ebenfalls mit zunehmender Temperatur langsam ab. Bei bzw. im Bereich der Glasübergangstemperatur fällt der Modul rasch auf ein niedrigeres, aber immer noch brauchbares Niveau ab. Wird die Temperatur weiter erhöht, bleibt der Modul auf oder knapp unter diesem neuen Niveau (gummielastisches Plateau), bis die Temperatur des Schmelzpunkts ( $T_m$ ) erreicht wird. Bei  $T_m$  nimmt der Modul wieder rasch ab. Teilkristalline Polymere werden oft bei Temperaturen oberhalb ihrer Glasübergangstemperaturen, jedoch unterhalb ihrer Schmelzpunkte verwendet, vor allem, wenn sie mit Glasfasern und/oder Mineralfüllstoffen modifiziert sind.

Bei der Verarbeitung teilkristalliner Polymere kann der Kristallinitätsgrad durch die Verarbeitungsbedingungen beeinflusst werden. Beispielsweise erfordern Produkte mit Amodel A-1000-PPA eine Werkzeugoberflächentemperatur von mindestens 135 °C, damit während des Spritzgießens der maximale Grad an Kristallinität erzielt wird. Produkte mit Amodel A-4000 oder A-6000 als Grundpolymer erreichen dagegen bei Werkzeugtemperaturen von ungefähr 80 °C eine hohe Kristallinität.

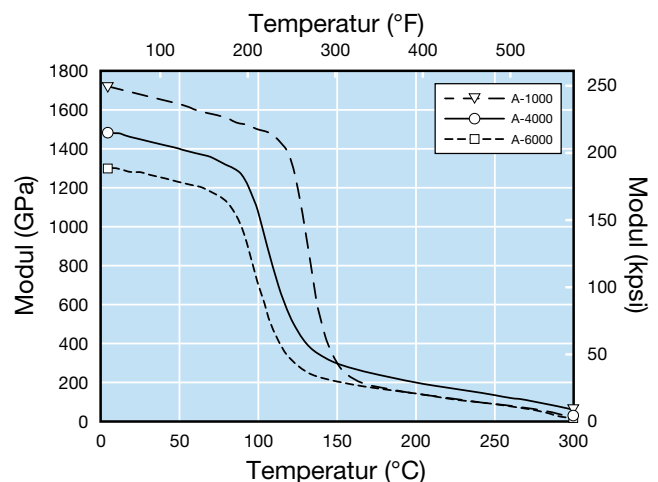
Oberhalb von  $T_m$  schmelzen teilkristalline Polymere und wechseln vom festen in den flüssigen Zustand.

Die thermischen Eigenschaften eines teilkristallinen Polymers werden zu einem großen Teil durch dessen  $T_g$  und  $T_m$  bestimmt, da diese Werte die Temperaturbereiche angeben, in denen das Polymer hohe Steifigkeit (unterhalb von  $T_g$ ), mittlere Steifigkeit (zwischen  $T_g$  und  $T_m$ ) oder keine brauchbare Steifigkeit (oberhalb von  $T_m$ ) aufweist. Abbildung 2 zeigt den Verlauf des Moduls in Abhängigkeit von der Temperatur der Amodel-Grundpolymere (gemessen mit der dynamisch-mechanischen Analyse [DMA]).

**Abbildung 1: Temperaturabhängige Moduländerungen**



**Abbildung 2: Modul von Amodel-Grundpolymeren in Abhängigkeit von der Temperatur**



## Auswirkungen von Feuchtigkeit

Wie andere Polymere auch, nimmt Polyphthalamid Feuchtigkeit aus der Umgebung auf. Im Allgemeinen nimmt Polyphthalamid weniger Wasser auf als aliphatische Polyamide (wie etwa PA 6,6) und es nimmt die Feuchtigkeit langsamer auf.

Wenn ein Gegenstand aus einem Amodel-Typ mit Grundpolymer A-1000 in einer Atmosphäre mit 100 % relativer Luftfeuchtigkeit (RL) den Gleichgewichtszustand erreicht, beträgt die Gewichtszunahme infolge von Feuchtaufnahme etwa 5–6 % des Gewichts des Polyphthalamids.

In Abbildung 3 werden die Glasübergangstemperaturen von Amodel A-1000 und PA 6,6 bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt verglichen. Diese Werkstoffe nehmen Feuchtigkeit unterschiedlich schnell auf und auch die Werte der maximalen Feuchtaufnahme variieren. Die nützlichsten und praktischsten Vergleichswerte erhält man, indem man  $T_g$  gegen den Gleichgewichts-Feuchtigkeitsgehalt bei verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten in einem Diagramm aufträgt.

Vergleicht man trockenes PA 6,6 mit trockenem Amodel A-1000, ergibt sich für Amodel eine um etwa 60 °C höhere  $T_g$ . Erfolgt der Vergleich bei dem Feuchtigkeitsgehalt von 50 % RL, liegt die  $T_g$  von Amodel um etwa 89 °C höher. Die ausgezeichnete Dimensionsstabilität und Beibehaltung der Eigenschaften von Amodel-Polyphthalamid liegt größtenteils an der höheren  $T_g$  und daran, dass die  $T_g$  selbst bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 100 % RL deutlich über der Raumtemperatur bleibt. Die  $T_g$  von PA 6,6 dagegen sinkt bei Feuchtigkeitsgehalten, die einem Gleichgewicht bei 50–60 % RL entsprechen, auf –15 °C.

In Abbildung 4 wird die Dimensionsänderung von Amodel A-1000 und PA 6,6 nach dem Eintauchen in Wasser bei 23 °C verglichen. Die gezeigten Ergebnisse wurden mit 3,2 mm dicken Platten erzielt. Nach etwa einem Jahr (ca. 8800 Stunden) beträgt die Dimensionsänderung des PA-Polymers etwa das Dreifache der Dimensionsänderung von PPA.

Polyphthalamid nimmt nicht nur weniger Feuchtigkeit auf als typische Polyamide, es nimmt sie auch viel langsamer auf. Der Diffusionskoeffizient für Wasser in Amodel A-1000 beträgt ungefähr 20 % des Diffusionskoeffizienten für PA 6,6 bei 23 °C.

Abbildung 3: Auswirkung von Feuchtigkeit auf  $T_g$

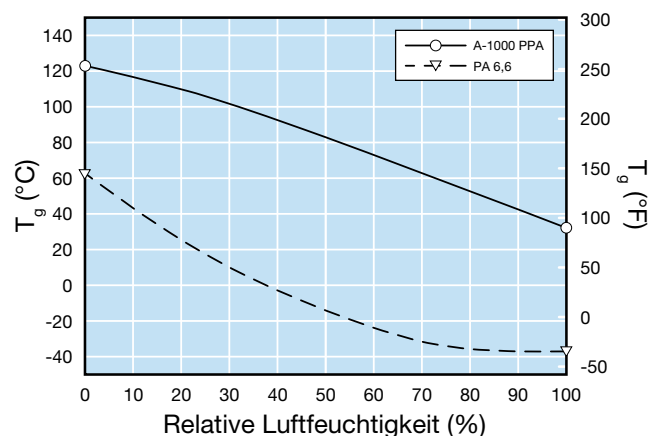
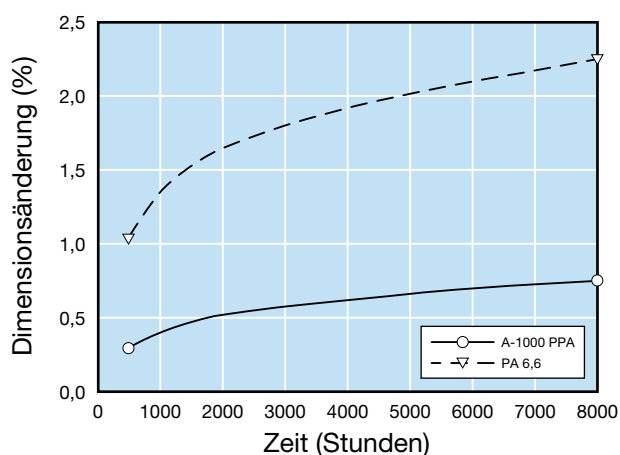


Abbildung 4: Dimensionsänderung in Abhängigkeit von der Eintauchzeit in Wasser



## Amodel-Polymer – Tabellen mit typischen Eigenschaften

Amodel-PPA-Polymere werden normalerweise mit Verstärkungen, Füllstoffen, Schlagzähmodifikatoren, Flammschützern, Farbstoffen und anderen Additiven kombiniert, um eine Vielzahl verschiedener Leistungsprofile zu erzielen. Derzeit umfasst die Produktfamilie über 100 im Handel erhältliche Typen. Dieses Handbuch enthält

detaillierte Angaben zu den Eigenschaften von 12 Typen, die als repräsentativ für die Produktfamilie ausgewählt wurden. Der für Sie zuständige Solvay-Vertriebsmitarbeiter kann Ihnen bei der Wahl des für Ihre Anwendung kostengünstigsten Materials helfen.

Die Grundpolymere sind aufgrund ihrer Kristallinität durchscheinend weiß. Die natürliche Farbe eines bestimmten Produkts hängt von den verwendeten Additiven ab. Die meisten Typen sind naturfarben und in Schwarz erhältlich. Häufig können auch andere Farben angeboten werden. Besprechen Sie Ihre Farbanforderungen am besten mit dem für Sie zuständigen Solvay-Vertriebsmitarbeiter.

**Tabelle 2: Nomenklaturesystem für Amodel-Polymere**

Stelle	Merkmal	Bedeutung/Beispiel
1. Buchstabe	Produktfamilie	<b>A = Amodel</b> E = Extra
Nächste(r) Buchstabe(n)	Optionale Beschreibung	E = Elektrik/Elektronik F = flammhemmend P = lackierbar/metallisierbar S = dickwandige Teile (> 3 mm) T = schlagzähmodifiziert
-	Bindestrich	
1. Ziffer	Grundpolymer	1 = A-100x-Grundpolymer 4 = A-400x-Grundpolymer 5 = A-500x-Grundpolymer 6 = A-600x-Grundpolymer 9 = A-900x-Grundpolymer
2. Ziffer	Füllstoff- oder Verstärkungsart	0 = ungefüllt 1 = Glasfaser 2 = Mineralstoff A 3 = Mineralstoff A + Glasfaser 4 = Mineralstoff B 5 = Mineralstoff B + Glasfaser 6 = Kohlenstoff- oder Graphitfaser 9 = glykolbeständig
3. und 4. Ziffer	Füllstoff- oder Verstärkungsgehalt	33 = 33 % Gewichtsprozent 45 = 45 % Gewichtsprozent usw.
Leerstelle		
Nächste(r) Buchstabe(n)	Suffix	HN = wärmostabilisiert, nicht geschmiert HS = wärmostabilisiert HSL = wärmostabilisiert und geschmiert L = geschmiert, nicht wärmostabilisiert NL = weder geschmiert noch wärmostabilisiert V0 Z = UL 94 V0 bei 0,8 mm
Leerstelle		
Nächste 2 Buchstaben	Farbcode	NT = naturfarben, unpigmentiert BK = schwarz WH = weiß usw.

## Nomenklatur

Amodel®-PPA-Typenbezeichnungen enthalten wichtige Angaben zur Zusammensetzung (siehe Tabelle 2). Es gibt nur wenige Abweichungen von diesem Nomenklatorsystem wie z. B. „ET“ für extrazähe Typen und „HFZ“ für Typen mit hohem Fließvermögen.

Beispiel: Amodel AFA-6133 V0 BK324 – ein flammhemmendes Produkt (AFA) basierend auf einem A-600x-Grundpolymer mit einem Glasfasergehalt von 33 Gewichtsprozent (6133). Es hat eine UL 94-Einstufung von V0 bei 0,8 mm Wandstärke und ist schwarz pigmentiert (Farbstoffformel 324).

## Produktauswahl

Solvay Specialty Polymers verfügt in der Branche über das breiteste und tiefste Sortiment von PPA-Polymeren. In Tabelle 3 ist die relative Leistungsfähigkeit mehrerer Amodel-Produkte aufgeführt, um Sie bei der Wahl des richtigen Produkts für Ihre spezielle Anwendung zu unterstützen. Die hier genannten Produkte stellen einen guten Querschnitt durch das Sortiment dar. Es gibt jedoch noch viele andere Typen, die hier nicht enthalten sind, und einer davon ist möglicherweise optimal für Sie. Es wird empfohlen, vor der endgültigen Produktwahl mit einem Vertriebsmitarbeiter von Solvay Specialty Polymers Kontakt aufzunehmen. Weitere Ressourcen für die Produktauswahl sowie technische Daten finden Sie auf der Website.

**Tabelle 3: Relative Einstufung ausgewählter Eigenschaften wichtiger Amodel-PPA-Typen<sup>(1)</sup>**

	<b>Festigkeit bei RT</b>	<b>Steifigkeit bei RT</b>	<b>Steifigkeit bei 100 °C</b>	<b>Schlagfes- tigkeit – gekerbt</b>	<b>Wärmeform- beständig- keit</b>	<b>Spezifisches Gewicht</b>
<b>Glasfaserverstärkte Typen</b>						
A-1133 HS	9	6	8	4	7	6
A-1145 HS	9	8	8	7	7	7
A-6135 HN	8	7	6	5	8	4
A-4133 HS	7	6	5	4	9	4
<b>Schlagzähmodifizierte Typen</b>						
AT-1002 HS	2	2	2	8	2	1
ET-1000 HS	1	1	1	9	1	1
<b>Schlagzähmodifizierte glasfaserverstärkte Typen</b>						
AT-1116 HS	5	4	4	7	4	3
AT-6115 HS	4	3	3	6	4	3
<b>Flammhemmende Typen</b>						
AFA-6133 V0 Z	6	8	7	5	6	8
<b>Mineral- und mineral-/glasfaserverstärkte Typen</b>						
A-1240 L	3	4	4	2	3	6
A-1565 HS	4	9	9	1	5	10
AS-1566 HS	8	9	9	3	6	9

<sup>(1)</sup> Einstufung der Eigenschaften von 1 bis 10 – 10 ist der Höchstwert

## Typische Eigenschaften

Die in den nachfolgenden Tabellen mit Kurzzeiteigenschaften aufgeführten typischen Eigenschaften liegen im Normalbereich der Produkteigenschaften. Die tatsächlichen Eigenschaften der einzelnen Chargen können jedoch innerhalb der Spezifikationsgrenzen variieren.

Diese Werte dürfen nicht zur Bestimmung von Spezifikationsgrenzen herangezogen und nicht als alleinige Grundlage für die Teilekonstruktion verwendet werden.

## Beschleunigte Feuchtigkeitsaufnahme

Polyamide nehmen in der Regel Feuchtigkeit aus der Atmosphäre auf. Und diese aufgenommene Feuchtigkeit kann einige der Materialeigenschaften beeinflussen. Um Konstrukteuren konkretere Angaben zu den Eigenschaften zur Verfügung zu stellen, geben Polyamidanbieter normalerweise die Eigenschaften für den „spritzfrischen“ Zustand sowie nach der Feuchtigkeitsaufnahme an. Standardmäßig wird ein Wert für 50 % RL aufgeführt. Das ist der Eigenschaftswert des Materials im Gleichgewichtszustand in einer Umgebung mit 50 % relativer Luftfeuchtigkeit. Dieses Vorgehen ist für Polyamid 6,6 angebracht, da das Polymer Feuchtigkeit rasch aufnimmt und sich viele seiner Eigenschaften infolge der Feuchtigkeit erheblich ändern.

Für Polyphthalamide ist dieser Ansatz nicht wirklich geeignet, da die Werkstoffe Feuchtigkeit langsamer aufnehmen und sich die meisten ihrer Eigenschaften infolge des Feuchtigkeitsgehalts nicht wesentlich ändern. Um jedoch die branchenüblichen Angaben zur Verfügung stellen zu können, wurden entsprechende Werte nach der Feuchtigkeitsaufnahme bestimmt. Bei der korrekten Vorbereitung von Probekörpern mit aufgenommener Feuchtigkeit werden die Probekörper so lange einer Umgebung mit 50 % RL ausgesetzt, bis ein konstantes Gewicht, d. h. Feuchtigkeitsgleichgewicht, erreicht ist. Die Rate der Feuchtigkeitsaufnahme von Amodel-PPA ist jedoch so gering, dass dieser Vorgang mehr als zwei Jahre dauern würde. Daher wurde ein Verfahren zur Beschleunigung der Feuchtigkeitsaufnahme entwickelt.

In diesem Verfahren werden die Probekörper in einer wässrigen Lösung mit 80 g Kaliumacetat pro 100 g Wasser 96 Stunden lang gekocht. Das Verfahren wurde empirisch entwickelt, um sich der Feuchtigkeitsaufnahme von Probekörpern anzunähern, die bis zum Erreichen des Gleichgewichts in einer Kammer mit konstanter Feuchtigkeit gelagert wurden. Da die bei dieser Methode verwendeten Temperaturen zwischen 100 °C und 130 °C liegen, findet ein gewisses Maß an Temperung statt und die für 50 % RL angegebenen Modulwerte sind daher manchmal um ein paar Prozent höher als die „spritzfrischen“ Werte.

Darüber hinaus führt der Kontakt mit dem wässrigen Medium bei diesen relativ hohen Temperaturen zusammen mit der Kontaktdauer von 96 Stunden zu einem gewissen Maß an Hydrolyse der Schnittstelle zwischen Glas und Polymermatrix. In vielen Fällen sind die Eigenschaftswerte, die von der Haftung zwischen Glas und Polymer abhängen, wie etwa die Zugfestigkeit, Kerbschlagzähigkeit usw., etwa 10 % geringer als bei einer Konditionierung der Probekörper bei 50 % RL in Luft bei Raumtemperatur.

**Tabelle 4: Glasfaserverstärkte Typen – mechanische Eigenschaften (US-Einheiten)**

Eigenschaft	Temperatur	Prüfmethode		Einheit	A-1133 HS	A-1145 HS	A-6135 HN	AS-4133 HS
		ASTM	ISO					
Zugfestigkeit	73 °F	D638		kpsi	32,0	37,5	29,4	29,0
Zugfestigkeit bei 50 % RL	73 °F	D638		kpsi	28,0	33,0	25,5	25,0
Zugfestigkeit	73 °F		527	kpsi	33,8	38,1	30,6	30,6
	212 °F		527	kpsi	21,5	25,1	17,6	18,1
	302 °F		527	kpsi	11,5	12,3	13,4	12,7
	347 °F		527	kpsi	10,4	11,0	11,9	11,5
Zugdehnung	73 °F	D638		%	2,5	2,6	1,9	2,5
Zugdehnung bei 50 % RL	73 °F	D638		%	2,1	2,1	2,1	2,2
Zugdehnung	73 °F		527	%	2,5	2,7	2,0	2,6
	212 °F		527	%	2,9	2,5	4,3	4,3
	302 °F		527	%	8,7	7,2	4,9	6,6
	347 °F		527	%	8,5	6,5	4,7	6,6
Zugmodul	73 °F	D638		Mpsi	1,90	2,50	2,00	1,70
Zugmodul bei 50 % RL	73 °F	D638		Mpsi	1,90	2,50	1,77	1,70
Zugmodul	73 °F		527	Mpsi	1,94	2,44	1,67	1,83
	212 °F		527	Mpsi	1,57	1,62	1,06	0,99
	302 °F		527	Mpsi	0,97	1,16	0,91	0,77
	347 °F		527	Mpsi	0,62	0,78	0,77	0,70
Biegefestigkeit	73 °F	D790		kpsi	46,0	52,6	45,0	42,0
Biegefestigkeit bei 50 % RL	73 °F	D790		kpsi	36,9	42,7	36,1	35,0
Biegefestigkeit	73 °F		178	kpsi	46,3	54,7	43,5	42,9
	212 °F		178	kpsi	33,0	38,7	24,7	25,6
	302 °F		178	kpsi	13,5	16,1	17,8	16,1
	347 °F		178	kpsi	11,5	13,7	16,2	14,4
Biegemodul	73 °F	D790		Mpsi	1,65	2,00	1,65	1,60
Biegemodul bei 50 % RL	73 °F	D790		Mpsi	1,65	2,00	1,59	1,60
Biegemodul	73 °F		178	Mpsi	1,68	2,31	1,65	1,51
	212 °F		178	Mpsi	1,42	1,89	0,96	1,04
	302 °F		178	Mpsi	0,58	0,78	0,71	0,67
	347 °F		178	Mpsi	0,52	0,71	0,67	0,61
Scherfestigkeit	73 °F	D732		kpsi	14,7	15,6	12,7	13,0
Scherfestigkeit bei 50 % RL	73 °F	D732		kpsi	12,9	13,3	10,7	11,0
Druckfestigkeit	73 °F	D695		kpsi	26,9	28,1	21,4	26,0
Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl)	73 °F				0,41	0,41	0,39	0,41
Izod-Kerbschlagzähigkeit	73 °F	D256		ft-lb/in	1,5	2,1	1,6	1,5
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 50 % RL	73 °F	D256		ft-lb/in	1,1	1,9	1,3	1,5
Izod-Schlagzähigkeit	73 °F	D4812		ft-lb/in	14	21	15	19
Izod-Kerbschlagzähigkeit	73 °F		180/1A	ft-lb/in <sup>2</sup>	4,2	4,9	4,3	4,6
Izod-Schlagzähigkeit	73 °F		180/1U	ft-lb/in <sup>2</sup>	23	29	30	28
Charpy-Schlagzähigkeitstest	73 °F		179/1eA	ft-lb/in <sup>2</sup>	4,5	4,9	4,4	5,1
Charpy-Schlagzähigkeit	73 °F		179/1eU	ft-lb/in <sup>2</sup>	35	44	28	32
Rockwell-Härte	73 °F	D785		R	125	125	125	124



**Tabelle 5: Glasfaserverstärkte Typen – mechanische Eigenschaften (SI-Einheiten)**

Eigenschaft	Temperatur	Prüfmethode		Einheit	A-1133 HS	A-1145 HS	A-6135 HN	AS-4133 HS
		ASTM	ISO					
Zugfestigkeit	23 °C	D638		MPa	221	259	202	200
Zugfestigkeit bei 50 % RL	23 °C	D638		MPa	193	228	178	172
Zugfestigkeit	23 °C		527	MPa	233	263	211	211
	100 °C		527	MPa	148	173	121	125
	150 °C		527	MPa	80	85	93	87
	175 °C		527	MPa	72	76	82	79
Zugdehnung	23 °C	D638		%	2,5	2,6	1,9	2,5
Zugdehnung bei 50 % RL	23 °C	D638		%	2,1	2,1	2,1	2,2
Zugdehnung	23 °C		527	%	2,5	2,7	2,0	2,6
	100 °C		527	%	2,9	2,5	4,3	4,3
	150 °C		527	%	8,7	7,2	4,9	6,6
	175 °C		527	%	8,5	6,5	4,7	6,6
Zugmodul	23 °C	D638		GPa	13,1	17,2	13,8	11,7
Zugmodul bei 50 % RL	23 °C	D638		GPa	13,1	17,2	12,2	11,7
Zugmodul	23 °C		527	GPa	13,4	16,8	11,5	12,6
	100 °C		527	GPa	10,8	11,2	7,3	6,8
	150 °C		527	GPa	6,7	8,0	6,3	5,3
	175 °C		527	GPa	4,3	5,4	5,3	4,8
Biegefestigkeit	23 °C	D790		MPa	317	363	310	290
Biegefestigkeit bei 50 % RL	23 °C	D790		MPa	254	294	249	241
Biegefestigkeit	23 °C		178	MPa	319	377	300	296
	100 °C		178	MPa	227	267	171	176
	150 °C		178	MPa	93	111	123	111
	175 °C		178	MPa	80	95	112	100
Biegemodul	23 °C	D790		GPa	11,4	13,8	11,4	11,0
Biegemodul bei 50 % RL	23 °C	D790		GPa	11,4	13,8	10,9	11,0
Biegemodul	23 °C		178	GPa	11,6	15,9	11,4	10,4
	100 °C		178	GPa	9,8	13,0	6,6	7,2
	150 °C		178	GPa	4,0	5,4	4,9	4,6
	175 °C		178	GPa	3,6	4,9	4,6	4,2
Scherfestigkeit	23 °C	D732		MPa	101	108	88	90
Scherfestigkeit bei 50 % RL	23 °C	D732		MPa	89	92	74	76
Druckfestigkeit	23 °C	D695		MPa	185	194	148	179
Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl)	23 °C				0,41	0,41	0,39	0,41
Izod-Kerbschlagzähigkeit	23 °C	D256		J/m	80	110	85	80
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 50 % RL	23 °C	D256		J/m	60	100	70	70
Izod-Schlagzähigkeit	23 °C	D4812		J/m	770	1105	780	1030
Izod-Kerbschlagzähigkeit	23 °C		180/1A	kJ/m <sup>2</sup>	8,8	10,3	9,1	9,7
Izod-Schlagzähigkeit	23 °C		180/1U	kJ/m <sup>2</sup>	49	61	62	59
Charpy-Schlagzähigkeitstest	23 °C		179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	9,5	10,3	9,2	10,7
Charpy-Schlagzähigkeit	23 °C		179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	73	93	60	68
Rockwell-Härte	23 °C	D785		R-Skala	125	125	125	124

**Tabelle 6: Glasfaserverstärkte Typen – thermische, elektrische und allgemeine Eigenschaften**

Eigenschaft	Prüfmethode		Einheit	A-1133 HS	A-1145 HS	A-6135 HN	AS-4133 HS
	ASTM	ISO					
Thermisch							
Formbeständigkeit unter Belastung (264 psi)	D648		°C	285	287	291	300
			°F	545	549	556	572
Formbeständigkeit unter Belastung (1,8 MPa)		75AF	°C	280	281	288	294
			°F	536	538	550	561
Vicat-Erweichungstemperatur	D1525	306	°C	303	304	301	314
			°F	577	580	573	597
Schmelzpunkt	D3418	11357-3	°C	313	310	310	327
			°F	595	590	590	620
Entflammbarkeit (3,2-mm-Probestab)	UL -94			HB	HB	HB	HB
Elektrisch							
Durchschlagfestigkeit bei 3,2 mm	D149		V/mil	533	584	—	510
			kV/mm	21	23	—	21
Durchschlagfestigkeit bei 1,6 mm	D149		V/mil	813	—	—	813
			kV/mm	32	—	—	32
Spezifischer Durchgangswiderstand	D257		Ohm-cm	1 x 10 <sup>16</sup>	1 x 10 <sup>16</sup>	—	1 x 10 <sup>16</sup>
Oberflächenwiderstand	D257		Ohm	1 x 10 <sup>15</sup>	—	—	1 x 10 <sup>15</sup>
Comparative Tracking Index	D3638		Volt	550	550	—	> 600
Dielektrizitätskonstante bei 60 Hz	D150			4,4	4,6	—	3,8
Dielektrizitätskonstante bei 100 Hz	D150			5,1	—	—	4,6
Dielektrizitätskonstante bei 10 <sup>6</sup> Hz	D150			4,2	4,4	—	3,6
Dielektrizitätskonstante bei 10 <sup>9</sup> Hz	D150			3,7	—	—	3,6
Dielektrischer Verlustfaktor bei 60 Hz	D150			0,005	0,005	—	0,004
Dielektrischer Verlustfaktor bei 10 <sup>6</sup> Hz	D150			0,017	0,016	—	0,012
Dielektrischer Verlustfaktor bei 10 <sup>9</sup> Hz	D150			0,016	—	—	0,013
Allgemein							
Spezifisches Gewicht	D792	1183A		1,48	1,59	1,45	1,45
Feuchtigkeitsaufnahme (24 Stunden)	D570	62	%	0,2	0,1	0,3	0,3
Formteilschwindung, Fließrichtung	D955	294-4	%	0,4	0,2	0,6	0,5
Formteilschwindung, quer zur Fließrichtung	D955	294-4	%	0,8	0,6	0,9	1,0

**Tabelle 7: Schlagzähmodifizierte Typen – mechanische Eigenschaften (US-Einheiten)**

Eigenschaft	Temperatur	Prüfmethode		Einheit	AT-1002 HS	ET-1000 HS
		ASTM	ISO			
Zugfestigkeit	73 °F	D638		kpsi	12,1	10,0
Zugfestigkeit bei 50 % RL	73 °F	D638		kpsi	11,1	9,1
Streckspannung	73 °F		527	kpsi	10,9	10,2
Bruchspannung	73 °F		527	kpsi	9,9	8,7
Streckspannung	212 °F		527	kpsi	5,6	4,9
Bruchspannung	212 °F		527	kpsi	–	–
Streckdehnung	73 °F	D638		%	5,0	6,0
Bruchdehnung	73 °F	D638		%	10–12	20,0
Bruchdehnung bei 50 % RL	73 °F	D638		%	30,0	18
Streckdehnung	73 °F		527	%	5,0	5,0
Bruchdehnung	73 °F		527	%	10,0	7,0
Streckdehnung	212 °F		527	%	3,7	4,3
Bruchdehnung	212 °F		527	%	> 95	> 95
Zugmodul	73 °F	D638		kpsi	400	350
Zugmodul bei 50 % RL	73 °F	D638		kpsi	400	350
Zugmodul	73 °F		527	kpsi	400	350
Zugmodul	212 °F		527	kpsi	305	290
Biegefestigkeit	73 °F	D790		kpsi	14,9	15,8
Biegefestigkeit bei 50 % RL	73 °F	D790		kpsi	10,6	12,4
Biegefestigkeit	73 °F		178	kpsi	11,5	10,2
Biegefestigkeit	212 °F		178	kpsi	7,2	6,4
Biegemodul	73 °F	D790		kpsi	320	330
Biegemodul bei 50 % RL	73 °F	D790		kpsi	330	310
Biegemodul	73 °F		178	kpsi	330	260
Biegemodul	212 °F		178	kpsi	250	190
Scherfestigkeit	73 °F	D732		kpsi	9,3	8,5
Scherfestigkeit bei 50 % RL	73 °F	D732		kpsi	8,3	–
Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl)	73 °F				0,38	0,39
Izod-Kerbschlagzähigkeit	73 °F	D256		ft-lb/in	2,4	17,0
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 50 % RL	73 °F	D256		ft-lb/in	2,6	20,0
Izod-Schlagzähigkeit	73 °F	D4812		ft-lb/in	Kein Bruch	Kein Bruch
Izod-Kerbschlagzähigkeit	73 °F		180/1A	ft-lb/in <sup>2</sup>	6,0	34,9
Izod-Schlagzähigkeit	73 °F		180/1U	ft-lb/in <sup>2</sup>	84	Kein Bruch
Charpy-Schlagzähigkeitstest	73 °F		179/1eA	ft-lb/in <sup>2</sup>	6,4	36,9
Charpy-Schlagzähigkeit	73 °F		179/1eU	ft-lb/in <sup>2</sup>	Kein Bruch	Kein Bruch
Rockwell-Härte	73 °F	D785		R	119	120

**Tabelle 8: Schlagzähmodifizierte Typen – mechanische Eigenschaften (SI-Einheiten)**

Eigenschaft	Temperatur	Prüfmethode		Einheit	AT-1002 HS	ET-1000 HS
		ASTM	ISO			
Zugfestigkeit	23 °C	D638		MPa	83	69
Zugfestigkeit bei 50 % RL	23 °C	D638		MPa	76	63
Streckspannung	23 °C		527	MPa	75	70
Bruchspannung	23 °C		527	MPa	68	60
Streckspannung	100 °C		527	MPa	39	34
Bruchspannung	100 °C		527	MPa		
Streckdehnung	23 °C	D638		%	5,0	6,0
Bruchdehnung	23 °C	D638		%	10–12	20,0
Bruchdehnung bei 50 % RL	23 °C	D638		%	30,0	18,0
Streckdehnung	23 °C		527	%	5,0	5,0
Bruchdehnung	23 °C		527	%	10,0	7,0
Streckdehnung	100 °C		527	%	3,7	4,3
Bruchdehnung	100 °C		527	%	> 95	> 95
Zugmodul	23 °C	D638		GPa	2,8	2,4
Zugmodul bei 50 % RL	23 °C	D638		GPa	2,8	2,4
Zugmodul	23 °C		527	GPa	2,8	2,4
Zugmodul	100 °C		527	GPa	2,1	2,0
Biegefestigkeit	23 °C	D790		MPa	103	109
Biegefestigkeit bei 50 % RL	23 °C	D790		MPa	73	85
Biegefestigkeit	23 °C		178	MPa	80	70
Biegefestigkeit	100 °C		178	MPa	50	44
Biegemodul	23 °C	D790		GPa	2,2	2,3
Biegemodul bei 50 % RL	23 °C	D790		GPa	2,3	2,2
Biegemodul	23 °C		178	GPa	2,3	1,8
Biegemodul	100 °C		178	GPa	1,8	1,3
Scherfestigkeit	23 °C	D732		MPa	64	59
Scherfestigkeit bei 50 % RL	23 °C	D732		MPa	57	
Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl)	23 °C				0,38	0,39
Izod-Kerbschlagzähigkeit	23 °C	D256		J/m	130	905
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 50 % RL	23 °C	D256		J/m	140	1065
Izod-Schlagzähigkeit	23 °C	D4812		J/m	Kein Bruch	Kein Bruch
Izod-Kerbschlagzähigkeit	23 °C		180/1A	kJ/m <sup>2</sup>	13	74
Izod-Schlagzähigkeit	23 °C		180/1U	kJ/m <sup>2</sup>	177	Kein Bruch
Charpy-Schlagzähigkeitstest	23 °C		179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	14	78
Charpy-Schlagzähigkeit	23 °C		179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	Kein Bruch	Kein Bruch
Rockwell-Härte	23 °C	D785			119	120

**Tabelle 9: Schlagzähmodifizierte Typen – thermische, elektrische und allgemeine Eigenschaften**

Eigenschaft	Prüfmethode		Einheit	A-1002 HS	ET-1000 HS
	ASTM	ISO			
Thermisch					
Formbeständigkeit unter Belastung (264 psi)	D648		°C	121	120
			°F	250	248
Formbeständigkeit unter Belastung (1,8 MPa)		75AF	°C	118	109
			°F	244	228
Vicat-Erweichungstemperatur	D1525	306	°C	286	283
			°F	547	542
Schmelzpunkt	D3418	11357-3	°C	315	310
			°F	599	590
Entflammbarkeit (3,2-mm-Probekörper)	UL -94			HB	HB
Elektrisch					
Durchschlagfestigkeit bei 3,2 mm	D149		V/mil	431	—
			kV/mm	17	—
Spezifischer Durchgangswiderstand	D257		Ohm-cm	1 x 10 <sup>16</sup>	—
Oberflächenwiderstand	D257		Ohm	8 x 10 <sup>13</sup>	—
Comparative Tracking Index	D3638		Volt	> 600	—
Dielektrizitätskonstante bei 60 Hz	D150			3,3	—
Dielektrizitätskonstante bei 10 <sup>6</sup> Hz	D150			3,3	—
Dielektrischer Verlustfaktor bei 60 Hz	D150			0,004	—
Dielektrischer Verlustfaktor bei 10 <sup>6</sup> Hz	D150			0,016	—
Allgemein					
Spezifisches Gewicht	D792	1183A		1,13	1,13
Feuchtigkeitsaufnahme (24 Stunden)	D570	62	%	0,5	0,7
Formteilschwindung, Fließrichtung	D955	294-4	%	2,0	1,5
Formteilschwindung, quer zur Fließrichtung	D955	294-4	%	2,1	1,5

**Tabelle 10: Schlagzähmodifizierte, glasfaserverstärkte und flammhemmende Typen – mechanische Eigenschaften (US-Einheiten)**

Eigenschaft	Temperatur	Prüfmethode		Einheit	AFA-6133		
		ASTM	ISO		AT-1116 HS	AT-6115 HS	V0 Z
Zugfestigkeit	73 °F	D638		kpsi	23,3	17,7	28,8
Zugfestigkeit bei 50 % RL	73 °F	D638		kpsi	19,0	13,9	24,1
Zugfestigkeit	73 °F		527	kpsi	23,2	16,5	27,0
	212 °F		527	kpsi	9,5	9,9	16,5
	302 °F		527	kpsi			10,9
	347 °F		527	kpsi			9,2
Zugdehnung	73 °F	D638		%	3,8	3,4	1,7
Zugdehnung bei 50 % RL	73 °F	D638		%	2,8	5,3	1,7
Zugdehnung	73 °F		527	%	3,7	3,9	1,6
	212 °F		527	%	4,2	7,7	2,4
	302 °F		527	%			5,1
	347 °F		527	%			4,9
Zugmodul	73 °F	D638		Mpsi	0,94	0,78	2,33
Zugmodul bei 50 % RL	73 °F	D638		Mpsi	1,03	0,97	1,99
Zugmodul	73 °F		527	Mpsi	1,00	0,78	2,10
	212 °F		527	Mpsi	0,97	0,45	1,33
	302 °F		527	Mpsi			0,86
	347 °F		527	Mpsi			0,74
Biegefestigkeit	73 °F	D790		kpsi	32,8	24,0	32,5
Biegefestigkeit bei 50 % RL	73 °F	D790		kpsi	29,1	16,7	33,2
Biegefestigkeit	73 °F		178	kpsi	28,6	24,7	37,6
	212 °F		178	kpsi	20,5	9,7	23,3
	302 °F		178	kpsi			14,6
	347 °F		178	kpsi			12,7
Biegemodul	73 °F	D790		Mpsi	0,87	0,64	1,90
Biegemodul bei 50 % RL	73 °F	D790		Mpsi	0,90	0,50	1,93
Biegemodul	73 °F		178	Mpsi	0,97	0,62	1,83
	212 °F		178	Mpsi	0,72	0,34	1,17
	302 °F		178	Mpsi			0,72
	347 °F		178	Mpsi			0,67
Scherfestigkeit	73 °F	D732		kpsi	10,1	8,2	11,6
Scherfestigkeit bei 50 % RL	73 °F	D732		kpsi	9,5	6,4	9,0
Druckfestigkeit	73 °F	D695		kpsi	18,0	14,5	21,1
Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl)	73 °F				0,40	0,39	0,37
Izod-Kerbschlagzähigkeit	73 °F	D256		ft-lb/in	1,8	1,7	1,6
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 50 % RL	73 °F	D256		ft-lb/in	0,9	1,5	1,5
Izod-Schlagzähigkeit	73 °F	D4812		ft-lb/in	18	16	13
Izod-Kerbschlagzähigkeit	73 °F		180/1A	ft-lb/in <sup>2</sup>	3,8	5,5	3,9
Izod-Schlagzähigkeit	73 °F		180/1U	ft-lb/in <sup>2</sup>	25	26	21
Charpy-Schlagzähigkeitstest	73 °F		179/1eA	ft-lb/in <sup>2</sup>	4,3	5,2	6,6
Charpy-Schlagzähigkeit	73 °F		179/1eU	ft-lb/in <sup>2</sup>	41	36	22
Rockwell-Härte	73 °F	D785		R-Skala	124	116	125

**Tabelle 11: Schlagzähmodifizierte, glasfaserverstärkte und flammhemmende Typen – mechanische Eigenschaften (SI-Einheiten)**

Eigenschaft	Temperatur	Prüfmethode		Einheit	AFA-6133		
		ASTM	ISO		AT-1116 HS	AT-6115 HS	V0 Z
Zugfestigkeit	23 °C	D638		MPa	161	122	199
Zugfestigkeit bei 50 % RL	23 °C	D638		MPa	131	96	166
Zugfestigkeit	23 °C		527	MPa	160	114	186
	100 °C		527	MPa	66	68	114
	150 °C		527	MPa			75
	175 °C		527	MPa			63
Zugdehnung	23 °C	D638		%	3,8	3,4	1,7
Zugdehnung bei 50 % RL	23 °C	D638		%	2,8	5,3	1,7
Zugdehnung	23 °C		527	%	3,7	3,9	1,6
	100 °C		527	%	4,2	7,7	2,4
	150 °C		527	%			5,1
	175 °C		527	%			4,9
Zugmodul	23 °C	D638		GPa	6,5	5,4	16,1
Zugmodul bei 50 % RL	23 °C	D638		GPa	7,1	6,7	13,7
Zugmodul	23 °C		527	GPa	6,9	5,4	14,5
	100 °C		527	GPa	6,7	3,1	9,2
	150 °C		527	GPa			5,9
	175 °C		527	GPa			5,1
Biegefestigkeit	23 °C	D790		MPa	226	165	224
Biegefestigkeit bei 50 % RL	23 °C	D790		MPa	201	115	229
Biegefestigkeit	23 °C		178	MPa	197	170	259
	100 °C		178	MPa	141	67	161
	150 °C		178	MPa			101
	175 °C		178	MPa			88
Biegemodul	23 °C	D790		GPa	6,0	4,4	13,1
Biegemodul bei 50 % RL	23 °C	D790		GPa	6,2	3,4	13,3
Biegemodul	23 °C		178	GPa	6,7	4,3	12,6
	100 °C		178	GPa	5,0	2,4	8,1
	150 °C		178	GPa			5,0
	175 °C		178	GPa			4,6
Scherfestigkeit	23 °C	D732		MPa	70	56	80
Scherfestigkeit bei 50 % RL	23 °C	D732		MPa	66	44	62
Druckfestigkeit	23 °C	D695		MPa	124	100	145
Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl)	23 °C				0,40	0,39	0,37
Izod-Kerbschlagzähigkeit	23 °C	D256		J/m	95	90	85
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 50 % RL	23 °C	D256		J/m	45	80	80
Izod-Schlagzähigkeit	23 °C	D4812		J/m	945	825	710
Izod-Kerbschlagzähigkeit	23 °C		180/1A	kJ/m <sup>2</sup>	8,1	11,6	8
Izod-Schlagzähigkeit	23 °C		180/1U	kJ/m <sup>2</sup>	53	54	44
Charpy-Schlagzähigkeitstest	23 °C		179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	9,1	11,0	14,0
Charpy-Schlagzähigkeit	23 °C		179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	85	75	47
Rockwell-Härte	23 °C	D785		R-Skala	124	116	125



**Tabelle 12: Schlagzähmodifizierte, glasfaserverstärkte und flammhemmende Typen – thermische, elektrische und allgemeine Eigenschaften**

Eigenschaft	Prüfmethode		Einheit	AT-1116	AT-6115	AFA-6133
	ASTM	ISO		HS	HS	V0 Z
Thermisch						
Formbeständigkeit unter Belastung (264 psi)	D648		°C	254	271	277
			°F	489	519	531
Formbeständigkeit unter Belastung (1,8 MPa)		75AF	°C	258	265	282
			°F	497	509	540
Vicat-Erweichungstemperatur	D1525	306	°C	295	296	291
			°F	563	565	556
Schmelzpunkt	D3418	11357-3	°C	310	307	310
			°F	590	585	590
Entflammbarkeit (3,2-mm-Probestab)	UL 94			HB	HB	V-0
Elektrisch						
Durchschlagfestigkeit bei 3,2 mm	D149		V/mil	—	533	609
			kV/mm	—	21	24
Durchschlagfestigkeit bei 1,6 mm	D149		V/mil		711	686
			kV/mm		28	27
Spezifischer Durchgangswiderstand	D257		Ohm-cm	—	1 x 10 <sup>16</sup>	1 x 10 <sup>16</sup>
Oberflächenwiderstand	D257		Ohm		1 x 10 <sup>15</sup>	1 x 10 <sup>15</sup>
Comparative Tracking Index	D3638		Volt	—	—	—
Dielektrizitätskonstante bei 60 Hz	D150			—	—	—
Dielektrizitätskonstante bei 100 Hz	D150			—	4,0	4,8
Dielektrizitätskonstante bei 10 <sup>6</sup> Hz	D150			—	3,3	4,1
Dielektrizitätskonstante bei 10 <sup>9</sup> Hz	D150			—	3,1	3,7
Dielektrischer Verlustfaktor bei 60 Hz	D150			—	—	—
Dielektrischer Verlustfaktor bei 100 Hz	D150			—	—	—
Dielektrischer Verlustfaktor bei 10 <sup>6</sup> Hz	D150			—	0,013	0,011
Dielektrischer Verlustfaktor bei 10 <sup>9</sup> Hz	D150			—	0,011	—
Allgemein						
Spezifisches Gewicht	D792	1183A		1,28	1,22	1,68
Feuchtigkeitsaufnahme (24 Stunden)	D570	62	%	0,2	0,2	0,2
Formteilschwindung, Fließrichtung	D955	294-4	%	0,6	1,0	0,3
Formteilschwindung, quer zur Fließrichtung	D955	294-4	%	0,6	1,1	0,6

**Tabelle 13: Mineral- und mineral-/glasfaserverstärkte Typen – mechanische Eigenschaften (US-Einheiten)**

Eigenschaft	Temperatur	Prüfmethode		Einheit	A-1240	A-1565	AS-1566
		ASTM	ISO		L	HS	HS
Zugfestigkeit	73 °F	D638		kpsi	15,0	19,0	30,0
Zugfestigkeit bei 50 % RL	73 °F	D638		kpsi	13,5	17,9	25,4
Zugfestigkeit	73 °F		527	kpsi	15,1	20,0	29,0
	212 °F		527	kpsi	10,1	13,3	18,4
	302 °F		527	kpsi	4,2	6,7	7,6
	347 °F		527	kpsi	3,5	4,7	6,3
Zugdehnung	73 °F	D638		%	1,6	1,2	1,7
Zugdehnung bei 50 % RL	73 °F	D638		%	1,2	1,2	1,8
Zugdehnung	73 °F		527	%	1,6	1,0	1,4
	212 °F		527	%	1,9	1,3	1,5
	302 °F		527	%	9,1	2,4	3,4
	347 °F		527	%	7,3	1,8	3,1
Zugmodul	73 °F	D638		Mpsi	1,30	3,00	2,90
Zugmodul bei 50 % RL	73 °F	D638		Mpsi	1,20	3,02	3,03
Zugmodul	73 °F		527	Mpsi	1,45	2,86	3,26
	212 °F		527	Mpsi	0,81	2,23	2,49
	302 °F		527	Mpsi	0,16	0,83	1,06
	347 °F		527	Mpsi	0,13	0,74	0,90
Biegefestigkeit	73 °F	D790		kpsi	30,0	30,5	42,0
Biegefestigkeit bei 50 % RL	73 °F	D790		kpsi	25,6	28,4	38,1
Biegefestigkeit	73 °F		178	kpsi	24,9	30,6	41,2
	212 °F		178	kpsi	17,6	23,6	29,7
	302 °F		178	kpsi	4,0	10,1	13,9
	347 °F		178	kpsi	3,2	8,1	11,0
Biegemodul	73 °F	D790		Mpsi	1,10	2,60	2,70
Biegemodul bei 50 % RL	73 °F	D790		Mpsi	1,00	2,61	2,88
Biegemodul	73 °F		178	Mpsi	1,00	1,32	2,98
	212 °F		178	Mpsi	0,87	0,99	2,44
	302 °F		178	Mpsi	0,16	0,36	1,06
	347 °F		178	Mpsi	0,13	0,33	0,93
Scherfestigkeit	73 °F	D732		kpsi	13,9	10,3	11,6
Scherfestigkeit bei 50 % RL	73 °F	D732		kpsi	13,5	7,2	9,1
Druckfestigkeit	73 °F	D695		kpsi	26,8	27,4	25,3
Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl)	73 °F				0,29	0,31	0,35
Izod-Kerbschlagzähigkeit	73 °F	D256		ft-lb/in	0,9	0,7	1,2
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 50 % RL	73 °F	D256		ft-lb/in	0,6	0,6	1,0
Izod-Schlagzähigkeit	73 °F	D4812		ft-lb/in	7	7	13
Izod-Kerbschlagzähigkeit	73 °F		180/1A	ft-lb/in <sup>2</sup>	2,2	1,9	3,1
Izod-Schlagzähigkeit	73 °F		180/1U	ft-lb/in <sup>2</sup>	11	15	21
Charpy-Schlagzähigkeitstest	73 °F		179/1eA	ft-lb/in <sup>2</sup>	1,9	1,6	2,9
Charpy-Schlagzähigkeit	73 °F		179/1eU	ft-lb/in <sup>2</sup>	14	21	16
Rockwell-Härte	73 °F	D785		R-Skala	125	124	122

**Tabelle 14: Mineral- und mineral-/glasfaserverstärkte Typen – mechanische Eigenschaften (SI-Einheiten)**

Eigenschaft	Temperatur	Prüfmethode		Einheit	A-1240	A-1565	AS-1566
		ASTM	ISO		L	HS	HS
Zugfestigkeit	23 °C	D638		MPa	103	131	207
Zugfestigkeit bei 50 % RL	23 °C	D638		MPa	93	123	175
Zugfestigkeit	23 °C		527	MPa	104	138	200
	100 °C		527	MPa	70	92	127
	150 °C		527	MPa	29	46	53
	175 °C		527	MPa	24	32	44
Zugdehnung	23 °C	D638		%	1,6	1,2	1,7
Zugdehnung bei 50 % RL	23 °C	D638		%	1,2	1,2	1,8
Zugdehnung	23 °C		527	%	1,6	1,0	1,4
	100 °C		527	%	1,9	1,3	1,5
	150 °C		527	%	9,1	2,4	3,4
	175 °C		527	%	7,3	1,8	3,1
Zugmodul	23 °C	D638		GPa	9,0	20,7	20,0
Zugmodul bei 50 % RL	23 °C	D638		GPa	8,3	20,8	20,9
Zugmodul	23 °C		527	GPa	10,1	20,0	22,8
	100 °C		527	GPa	5,6	15,4	17,2
	150 °C		527	GPa	1,1	5,7	7,3
	175 °C		527	GPa	0,9	5,1	6,2
Biegefestigkeit	23 °C	D790		MPa	207	210	290
Biegefestigkeit bei 50 % RL	23 °C	D790		MPa	177	196	263
Biegefestigkeit	23 °C		178	MPa	172	211	284
	100 °C		178	MPa	121	162	205
	150 °C		178	MPa	27	70	96
	175 °C		178	MPa	22	56	76
Biegemodul	23 °C	D790		GPa	7,6	17,9	18,6
Biegemodul bei 50 % RL	23 °C	D790		GPa	6,9	18,0	19,8
Biegemodul	23 °C		178	GPa	7,0	9,1	20,8
	100 °C		178	GPa	6,0	6,8	16,8
	150 °C		178	GPa	1,1	2,5	7,3
	175 °C		178	GPa	0,9	2,3	6,4
Scherfestigkeit	23 °C	D732		MPa	96	71	80
Scherfestigkeit bei 50 % RL	23 °C	D732		MPa	93	50	63
Druckfestigkeit	23 °C	D695		MPa	185	189	174
Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl)	23 °C				0,29	0,31	0,35
Izod-Kerbschlagzähigkeit	23 °C	D256		J/m	50	35	65
Izod-Kerbschlagzähigkeit bei 50 % RL	23 °C	D256		J/m	30	30	55
Izod-Schlagzähigkeit	23 °C	D4812		J/m	345	395	700
Izod-Kerbschlagzähigkeit	23 °C		180/1A	kJ/m <sup>2</sup>	4,7	4,0	6,6
Izod-Schlagzähigkeit	23 °C		180/1U	kJ/m <sup>2</sup>	24	31	44
Charpy-Schlagzähigkeitstest	23 °C		179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	4,1	3,4	6,2
Charpy-Schlagzähigkeit	23 °C		179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	29	44	34
Rockwell-Härte	23 °C	D785		R	125	124	122

**Tabelle 15: Mineral- und mineral-/glasfaserverstärkte Typen – thermische, elektrische und allgemeine Eigenschaften**

Eigenschaft	Prüfmethode		Einheit	A-1240	A-1565	AS-1566
	ASTM	ISO		L	HS	HS
Thermisch						
Formbeständigkeit unter Belastung (264 psi)	D648		°C	179	271	278
			°F	355	520	532
Formbeständigkeit unter Belastung (1,8 MPa)		75AF	°C	174	271	280
			°F	346	520	536
Vicat-Erweichungstemperatur	D1525	306	°C	302	296	298
			°F	575	565	569
Schmelzpunkt	D3418	11357-3	°C	310	311	311
			°F	590	592	592
Entflammbarkeit (3,2-mm-Probestab)	UL -94			HB	HB	HB
Elektrisch						
Durchschlagfestigkeit bei 1,6 mm	D149		V/mil	—	—	737
			kV/mm	—	—	29
Spezifischer Durchgangswiderstand	D257		Ohm-cm	9 x 10 <sup>15</sup>	4 x 10 <sup>14</sup>	1 x 10 <sup>16</sup>
Oberflächenwiderstand	D257		Ohm	—	—	1 x 10 <sup>15</sup>
Comparative Tracking Index	D3638		Volt	550	> 600	—
Dielektrizitätskonstante bei 60 Hz	D150			—	—	—
Dielektrizitätskonstante bei 100 Hz	D150			4,2	—	5,7
Dielektrizitätskonstante bei 10 <sup>6</sup> Hz	D150			4,0	—	4,7
Dielektrischer Verlustfaktor bei 60 Hz	D150			—	—	—
Dielektrischer Verlustfaktor bei 100 Hz	D150			0,006	—	—
Dielektrischer Verlustfaktor bei 10 <sup>6</sup> Hz	D150			0,017	—	0,011
Allgemein						
Spezifisches Gewicht	D792	1183A		1,54	1,90	1,84
Feuchtigkeitsaufnahme (24 Stunden)	D570	62	%	0,1	0,1	0,1
Formteilschwindung, Fließrichtung	D955	294-4	%	1,0	0,3	0,3
Formteilschwindung, quer zur Fließrichtung	D955	294-4	%	1,0	0,5	0,5

# Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffes sind bei der Teilekonstruktion für Konstrukteure von ausschlaggebender Bedeutung. Um zu bestimmen, welches Material sich für eine bestimmte Teilekonstruktion eignet, muss ein Konstrukteur die Leistungsanforderungen jeder Anwendung mit den mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Werkstoffkandidaten in Einklang bringen. Umgekehrt kann der Konstrukteur die Materialkennwerte für eine optimale Auslegung des Teils heranziehen.

Zur Unterstützung der Konstrukteure sind die in diesem Handbuch aufgeführten Materialeigenschaften in Kurzzeit- (unmittelbar) und Langzeiteigenschaften (zeitabhängig) gruppiert. Bei den Kurzzeiteigenschaften wird im Allgemeinen die Festigkeit beim Versagen gemessen, während die Langzeiteigenschaften angeben, wie die Materialeigenschaften durch Temperatur, Dauerbelastung oder Chemikalieneinwirkung in Abhängigkeit von der Zeit beeinflusst werden.

## Mechanische Kurzzeiteigenschaften

Zu den mechanischen Kurzzeiteigenschaften zählen normalerweise: Zugfestigkeit und Zugmodul, Biegefestigkeit und Biegemodul, verschiedene Schlagzähigkeiten, Druckfestigkeit, Scherfestigkeit und Oberflächenhärte. Diese Eigenschaften werden normalerweise für Raumtemperatur – bei Bedarf jedoch auch für andere Temperaturen – angegeben. Da einige Polymere Luftfeuchtigkeit aufnehmen, wodurch die Materialeigenschaften beeinflusst werden können, wird u. U. auch der Feuchtigkeitsgehalt in Relation zur relativen Luftfeuchtigkeit (RL) angegeben.

Die von Werkstofflieferanten erhältlichen Datenblätter enthalten normalerweise Kurzzeiteigenschaften, die vorwiegend für den Vergleich von ähnlichen Werkstoffen herangezogen werden. Bei Verwendung von Datenblättern zum Vergleich von Werkstoffen muss unbedingt darauf geachtet werden, dass dieselben Prüfmethoden verwendet wurden und dass die Daten in vergleichbaren Einheiten angegeben sind.

Der Nutzen mechanischer Kurzzeiteigenschaften für die Teilekonstruktion ist begrenzt. Normalerweise werden die Materialeigenschaften anhand von geformten Probekörpern bestimmt, die so ausgelegt sind, dass sie unter sorgfältig kontrollierten Umgebungsbedingungen bei vorgegebenen Belastungsgeschwindigkeiten reproduzierbare Ergebnisse liefern. Diese Messungen liefern oft den höchsten Wert, der sich für eine Eigenschaft und ein Material ergeben kann.

Wenn Teile durch ein Formverfahren hergestellt werden, enthalten sie mit größter Wahrscheinlichkeit Merkmale wie Spannungskonzentrationen, Bindenähte und Ecken bzw. andere Aspekte, die die Festigkeit reduzieren können. Die Festigkeit eines Werkstoffes in einem realen Bauteil kann außerdem durch die Orientierung von Verstärkungsfasern, den relativen Kristallinitätsgrad oder die thermische Vorbehandlung (Temperung) reduziert bzw. in manchen Fällen erhöht werden. Darüber hinaus geben die

Kurzzeiteigenschaften keinerlei Hinweise zu zeitabhängigen Effekten bzw. zu Reaktionen auf Chemikalien.

## Zugeigenschaften

### Prüfmethoden

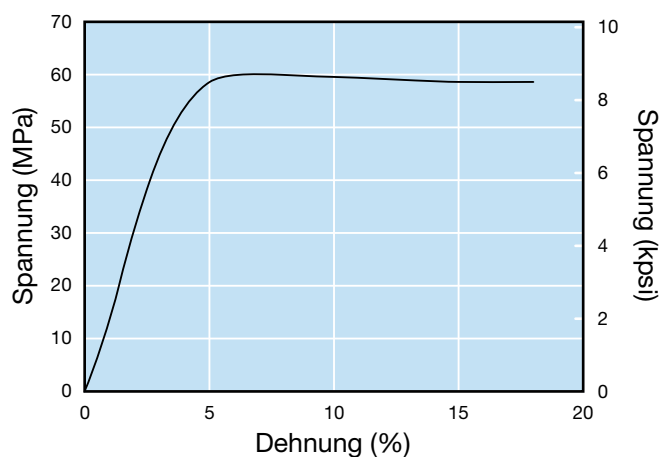
Es gibt zwei weitläufig anerkannte Methoden zum Prüfen der Zugeigenschaften – ASTM-Methode D638 und ISO-Methode 527. Diese Prüfmethoden messen dieselbe Eigenschaft, jedoch unterscheiden sich die Probekörper und Prüfabläufe geringfügig. Wird das gleiche Material mit beiden Methoden geprüft, erhält man ähnliche, aber nicht identische Ergebnisse. Daher sollten nur Werte direkt miteinander verglichen werden, die mit derselben Methode ermittelt worden sind. In diesem Handbuch wird bei Angaben zu Zugeigenschaften auch die jeweilige Prüfmethode angegeben. Zudem werden häufig Werte für beide Methoden aufgeführt.

Unabhängig von der jeweiligen Prüfmethode werden zur Bestimmung der Zugeigenschaften beide Enden eines Probekörpers in die Spannbacken einer Prüfmaschine eingespannt, die eine axiale Zugkraft mit einer bestimmten Geschwindigkeit in einer Richtung ausübt. Die Kraft, die zum Auseinanderziehen der Einspannbacken benötigt wird, dividiert durch die kleinste Querschnittsfläche des Probekörpers, wird als Zugspannung definiert. Durch die angelegte Spannung wird der Probekörper gedehnt. Der Betrag der Längenänderung dividiert durch die ursprüngliche Länge des Probekörpers wird Dehnung genannt.

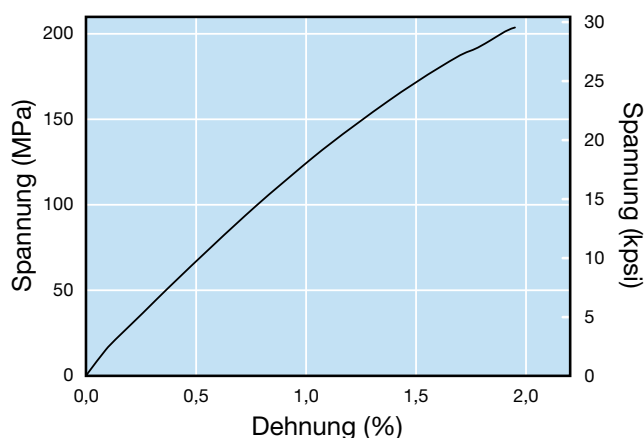
Wenn die angelegte Spannung über die resultierende Dehnung aufgetragen wird, erhält man eine Kennlinie ähnlich wie in Abbildung 5 für Amodel ET-1000 HS. Das ist ein „Spannungs-Dehnungs-Diagramm“, das zur Bestimmung des Kurzzeitverhaltens eines Materials bei einer aufgetragenen Last sehr hilfreich ist. Für ein duktileres Metall hätte die Kennlinie einen ähnlichen Verlauf.

Abbildung 6 zeigt ein typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm für ein nicht-duktileres Material (Amodel A-1933 PPA). Die Bruchdehnung ist wesentlich geringer als die des unverstärkten Typs. Die Glasfaserverstärkung erhöht die Festigkeit und Steifigkeit, verringert jedoch die Bruchdehnung.

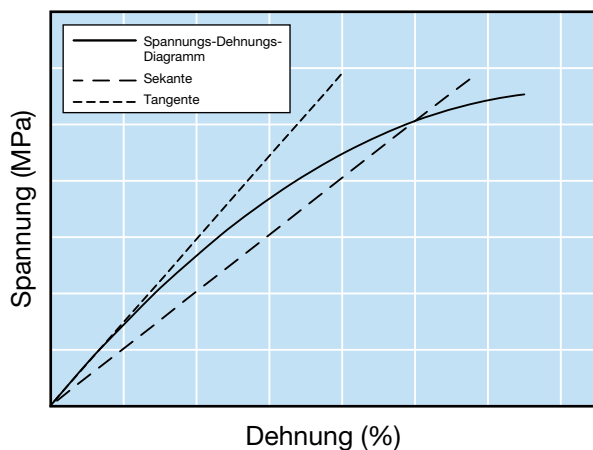
**Abbildung 5: Typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Amodel ET-1000**



**Abbildung 6: Typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Amodel A-1933**



**Abbildung 7: Sekanten- und Tangentenmethode zum Abschätzen des Moduls**

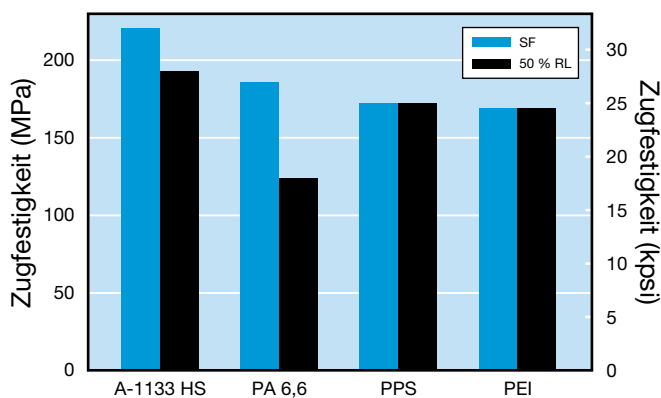


Der Anfangsabschnitt der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie ist von besonderem Interesse, da die Steigung der Steifigkeit bzw. dem Modul des Materials entspricht (siehe Abbildung 7).

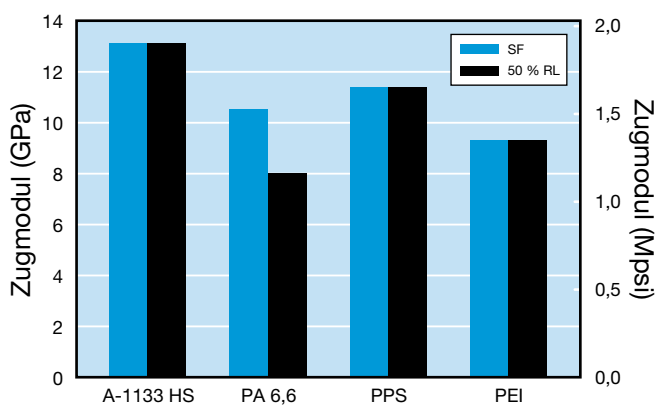
Es wird deutlich, dass bis zu einem bestimmten Spannungsniveau die Dehnung direkt proportional zur Spannung ist. Dieser Bereich wird als „Hookescher“ oder elastischer Bereich bezeichnet. Die größte Spannung, die eine dazu proportionale Dehnung hervorruft, wird Proportionalitätsgrenze genannt.

Der Zug- oder Elastizitätsmodul ist die Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie, wenn ein Probekörper einer Zugbelastung ausgesetzt wird. Da die Spannungs-Dehnungs-Kennlinie oberhalb der Proportionalitätsgrenze nichtlinear ist, wurden zur Standardisierung der Messungen und zur Reduzierung von Schwankungen der Testergebnisse bestimmte Berechnungsmethoden entwickelt. Eine Methode verwendet die Steigung einer Tangente an der Kennlinie, eine andere Methode benutzt die Steigung einer Sekante, die durch den Anfangspunkt und einen willkürlich festgelegten

**Abbildung 8: Zugfestigkeit von Polymeren mit 30–33 % GF**



**Abbildung 9: Zugmodul von Polymeren mit 30–33 % GF**

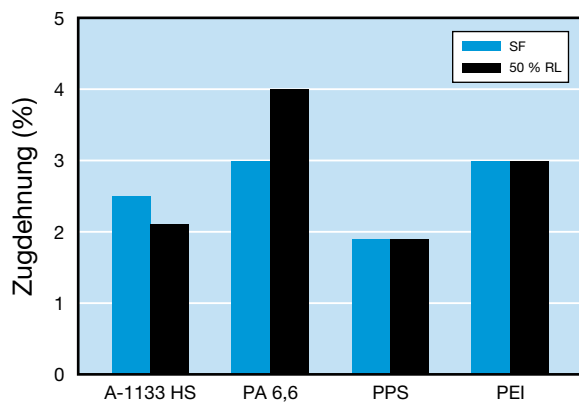


Dehnungsgrad (normalerweise 1 %) gezogen wird. Die Tangentenmethode wurde aus der ISO-Prüfmethode entfernt und durch eine Steigungsberechnung basierend auf den vorgegebenen Dehnungswerten 0,0005 und 0,0025 ersetzt. Alternativ können computergesteuerte Maschinen die Methode der kleinsten Quadrate nutzen, um die Steigung im selben Dehnungsbereich zu berechnen.

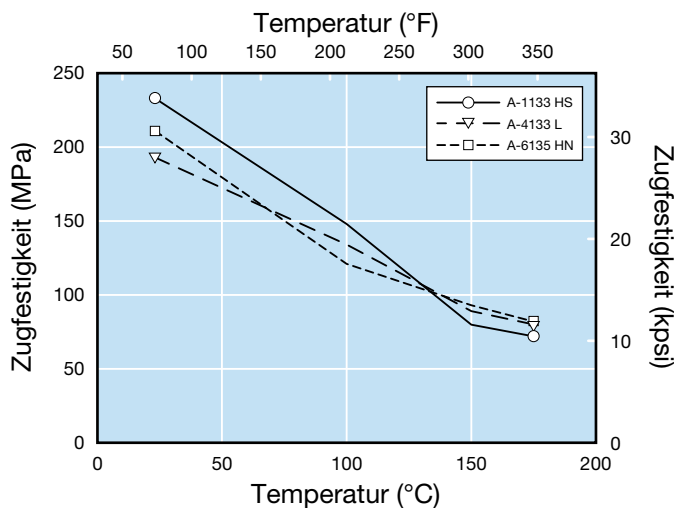
Für die Bestimmung der in diesem Handbuch angegebenen Zugwerte gemäß ASTM D638 wurde die Tangentenmethode verwendet.

Duktile Polymere durchlaufen vor dem Bruch eine Streckgrenze. An dieser Stelle erfährt das Material eine zusätzliche Längenänderung, ohne dass die Spannung zunimmt. Der Spannungswert an der Streckgrenze wird häufig „Streckspannung“ genannt. Die an diesem Punkt erreichte Dehnung wird „Streckdehnung“ genannt. Während des Prüfvorgangs wird der Probekörper bis zum Bruch weiter gedehnt. Die Spannung an diesem Punkt wird „Bruchfestigkeit“ genannt. Die Zugfestigkeit ist definiert als die größere der gemessenen Spannungen, wobei es sich sowohl um die Streckspannung als auch um die Bruchspannung handeln kann.

**Abbildung 10: Zugdehnung von Polymeren mit 30–33 % GF**



**Abbildung 11: Zugfestigkeit von PPA mit 33 % GF in Abhängigkeit von der Temperatur**



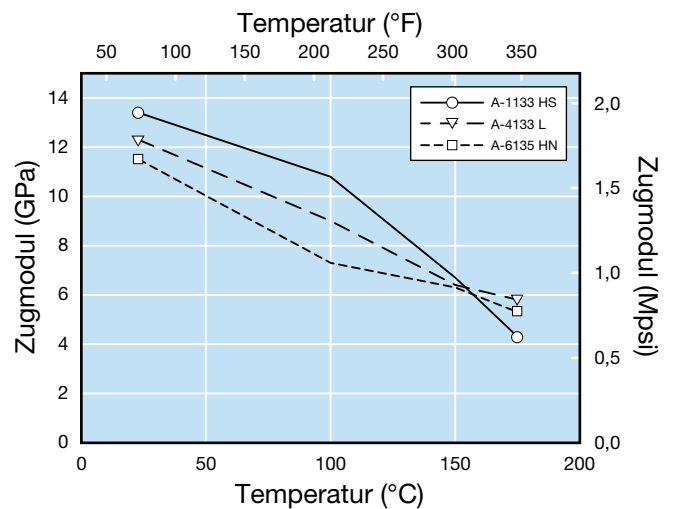
### Vergleich von Zugeigenschaften

Amodel A-1133 HS hat eine höhere Zugfestigkeit bei Raumtemperatur als 33-%-GF-Polyamid (PA) 6,6, 30-%-GF-Polyphenylensulfid (PPS) und 30-%-GF-Polyetherimid (PEI) (siehe Abbildung 8). Selbst nach der Feuchtigkeitsaufnahme hat das Amodel-PPA eine höhere Festigkeit als die übrigen Polymere.

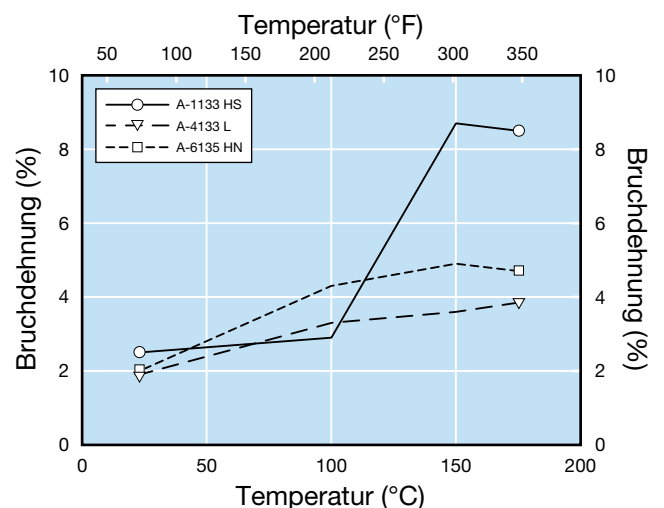
Der Zugmodul von Amodel-PPA mit 33 % GF wird in Abbildung 9 mit den gleichen Polymeren verglichen. Das Amodel-Polymer hat im spritzfrischen Zustand einen höheren Modul und weist nach der Feuchtigkeitsaufnahme keine Verschlechterung auf, während für das PA 6,6 eine Abnahme des Moduls von über 20 % verzeichnet wird.

Der Vergleich für die Zugdehnung ist in Abbildung 10 dargestellt. Aufgrund der Glasfaserverstärkung weisen die Polymere eine geringe Zugdehnung auf. Die Feuchtigkeitsaufnahme führt bei PA 6,6 zu einer Zunahme der Dehnung aufgrund der Senkung der  $T_g$ .

**Abbildung 12: Zugmodul von PPA mit 33 % GF in Abhängigkeit von der Temperatur**



**Abbildung 13: Zugdehnung von PPA mit 33 % GF in Abhängigkeit von der Temperatur**

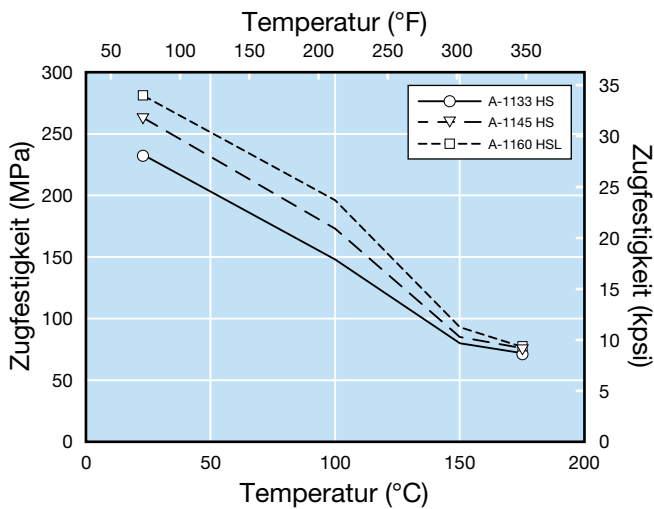


### Zugeigenschaften von GF-PPA in Abhängigkeit von der Temperatur

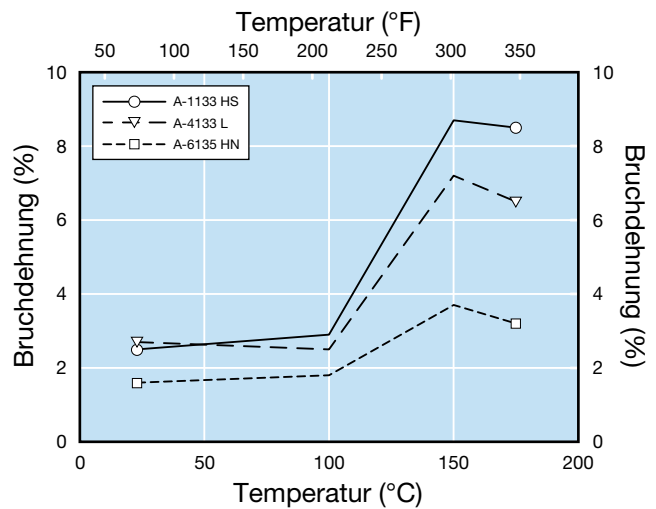
Die Abbildungen 11 bis 13 zeigen die Zugeigenschaften von glasfaserverstärkten Amodel-PPA-Typen mit den Grundpolymeren A-1000, A-4000 und A-6000 im Bereich zwischen Raumtemperatur und 175 °C. Amodel A-1133 HS hat die höchste Festigkeit und Steifigkeit bei Raumtemperatur, oberhalb von 150 °C weisen jedoch A-4133 L und A-6135 HN die höhere Festigkeit und Steifigkeit auf.



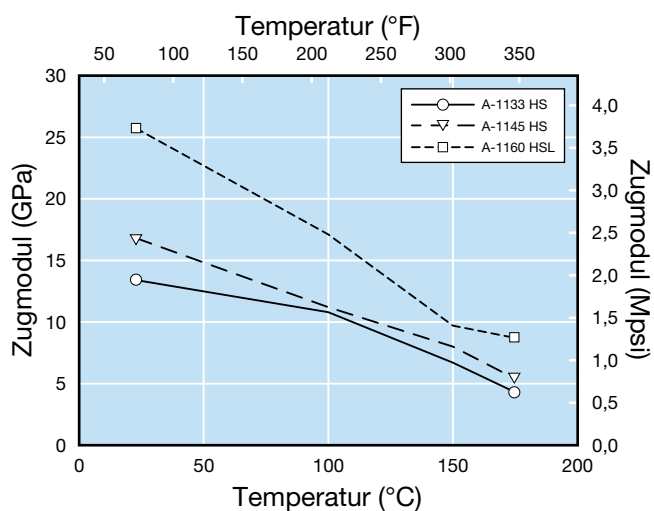
**Abbildung 14: Zugfestigkeit von GF-A-1000-PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur**



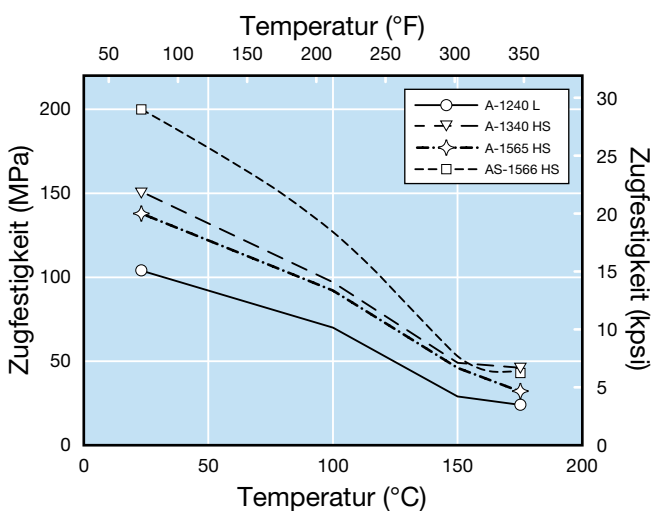
**Abbildung 16: Zugdehnung von GF-A-1000-PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur**



**Abbildung 15: Zugmodul von GF-A-1000-PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur**



**Abbildung 17: Zugfestigkeit von mineral-/glasfaserverstärkten PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur**

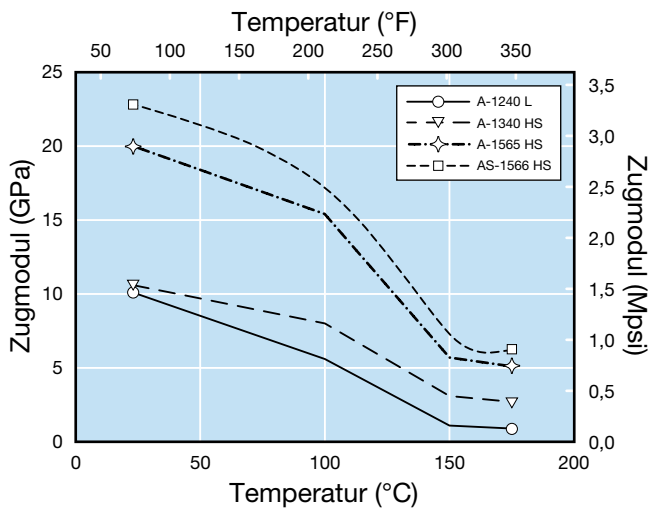


### Zugeigenschaften von GF-A-1000-Typen bei hohen Temperaturen

Die Abbildungen 14 bis 16 zeigen die Zugeigenschaften von drei glasfaserverstärkten Amodel-PPA-Typen mit dem Grundpolymer A-1000 und einem Glasfasergehalt von 33 %, 45 % bzw. 60 % im Bereich zwischen Raumtemperatur (RT) und 175 °C. Die Zugfestigkeit und der Zugmodul nehmen mit dem Glasfasergehalt zu, was für teilkristalline Thermoplaste typisch ist.

Sowohl die Festigkeit als auch der Modul nehmen mit steigender Temperatur ab. Die Dehnung nimmt mit steigender Temperatur zu. Da es sich um ein teilkristallines Material handelt, weisen Amodel-Polymere mit zunehmender Temperatur im Bereich zwischen Umgebungstemperatur und Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) eine langsame aber stetige Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften auf. Bei der  $T_g$  findet eine größere Verschlechterung in einem schmalen Temperaturbereich statt, gefolgt von einer weiteren allmählichen Abnahme. Dieses Verhalten ist typisch für alle teilkristallinen Thermoplaste.

**Abbildung 18: Zugmodul von mineral-/  
glasfaserverstärkten PPA-Typen in  
Abhängigkeit von der Temperatur**



## Biegeeigenschaften

Wie die Zugfestigkeit und der Zugmodul können die Biegefestigkeit und der Biegemodul eines Kunststoffes durch Zugabe von Glasfasern zum Polymer erhöht werden. Eine entsprechende Behandlung der Glasfasern kann eine starke chemische Bindung zwischen Kunststoff und Glas bewirken, die sowohl die Zug- als auch die Biegeeigenschaften für zahlreiche Umgebungsbedingungen verbessert. Mit zunehmendem Glasfasergehalt des Kunststoffes nehmen auch die Biegefestigkeit und der Biegemodul zu.

## Prüfmethode

Die Biegeeigenschaften von Thermoplasten werden entweder gemäß ASTM D790 oder gemäß ISO 178 bestimmt. ASTM D790 umfasst eine Dreipunkt-Belastungsprüfung (Methode I) sowie eine Vierpunkt-Belastungsprüfung (Methode II). Für die in diesem Handbuch aufgeführten D790-Angaben wurde Methode I verwendet. Die Norm ISO 178 „Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften“ schreibt eine Dreipunktbelastung vor.

Die zwei Prüfmethode unterscheiden sich in den Probekörperabmessungen, in den Spezifikationen für die Prüfvorrichtung, in der maximalen Durchbiegung und in den Einzelheiten der Berechnung. Bei der Dreipunktbelastung wird der Probekörper an zwei Auflagepunkten, die sich in einem vorgegebenen Abstand voneinander befinden, gestützt und eine vertikale Punktlast wird in der Mitte auf die Oberseite des Probekörpers aufgebracht. Der Probekörper wird als Folge der Belastung verformt bzw. gebogen. Der Probekörper wird gebogen, bis er bricht oder bis die maximale Faserdehnung erreicht wird. Die Biegefestigkeit ist definiert als die maximale Faserspannung zum Zeitpunkt des Bruches bzw. der maximalen Dehnung. Die bei ISO 178 angegebene maximale Dehnung beträgt 3,5 % und bei ASTM D790 5 %.

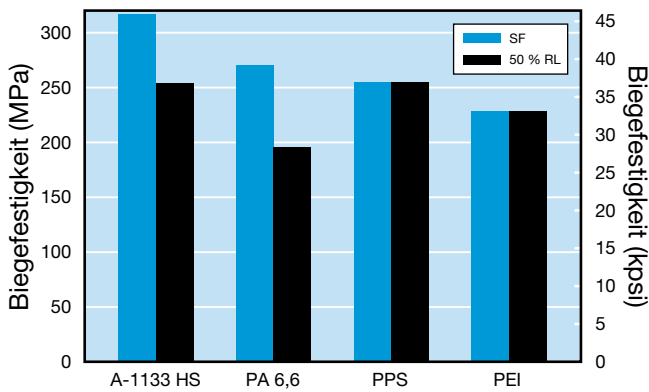
Wenn die Biegeeigenschaften eines Materials mithilfe von beiden Methoden bestimmt werden, unterscheiden sich die ASTM-Ergebnisse von den ISO-Ergebnissen. In den Tabellen mit typischen Eigenschaften sind die Werte für beide Methoden aufgeführt. Beim Vergleichen von Werkstoffen muss darauf geachtet werden, dass die verglichenen Daten mit derselben Prüfmethode und unter den gleichen Testbedingungen bestimmt wurden.

Der Biege-Elastizitätsmodul ist das Verhältnis (innerhalb der Elastizitätsgrenze) der Spannung in der äußersten Faser des beanspruchten Gegenstands zur entsprechenden Dehnung. Wie bei der Zugfestigkeitsprüfung wird der Modul anhand der Steigung der Last-Durchbiegungskurve im linearen „Hookeschen“ Bereich berechnet.

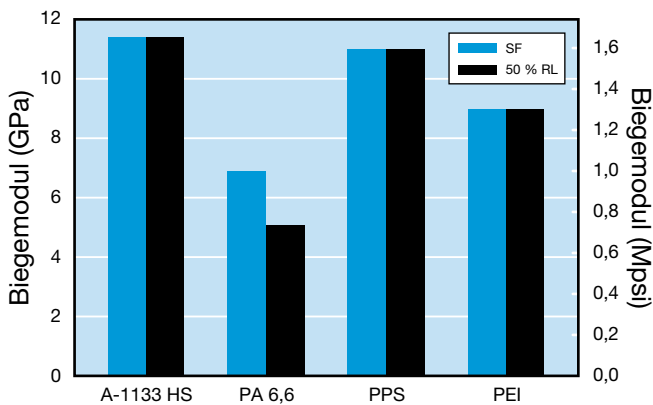
Die Biegeprüfung liefert Daten zur relativen Festigkeit und Steifigkeit von Materialien, wenn sie Biegebelastungen ausgesetzt werden. Das Material mit der höheren Biegefestigkeit kann höhere Biegebelastungen ohne Bruch ertragen. Teile aus einem Werkstoff mit höherem Biegemodul biegen sich bei einer Biegebelastung weniger als Teile aus einem Werkstoff mit niedrigerem Modul.

Glasfasern und Mineralstoffadditive erhöhen die Biegefestigkeit und den Biegemodul von Amodel-PPA im Vergleich zum unverstärkten Polymer. Der resultierende höhere Modul ist in vielen Anwendungen erwünscht.

**Abbildung 19: Biegefestigkeit von Polymeren mit 30–33 % GF**



**Abbildung 20: Biegemodul von Polymeren mit 30–33 % GF**

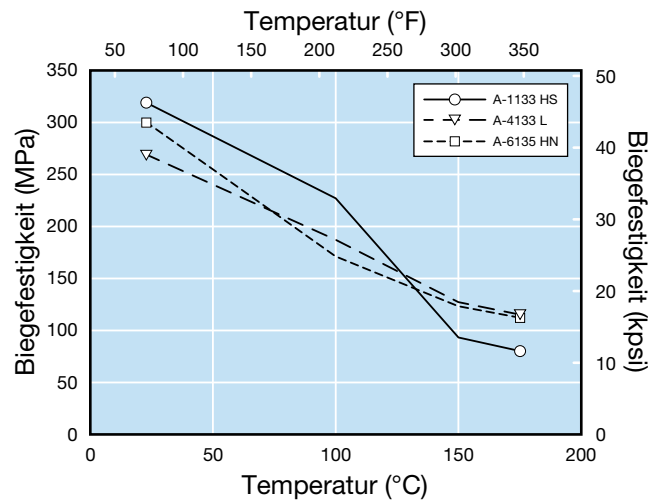


### Vergleich von Biegeeigenschaften

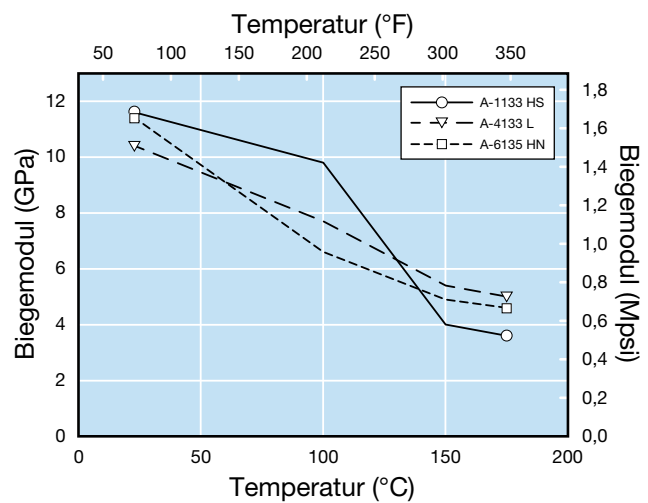
Die Biegefestigkeit von 33-%-GF-Amodel-PPA wird in Abbildung 19 den Werten von vergleichbaren PPS-, PEI- und PA 6,6-Polymeren gegenübergestellt. Die Festigkeit von Amodel-PPA ist höher als die der anderen Polymere und trotz einer geringen Abnahme ist sie nach der Feuchtigkeitsaufnahme immer noch höher als die der meisten anderen Werkstoffe im spritzfrischen Zustand.

Der Vergleich des Biegemoduls ist in Abbildung 20 dargestellt. Der Biegemodul von Amodel ist relativ hoch und wird durch die Feuchtigkeitsaufnahme nicht beeinträchtigt. Der Modul von PA 6,6 nimmt dagegen durch die Feuchtigkeitsaufnahme erheblich ab.

**Abbildung 21: Biegefestigkeit von GF-PPA-Polymeren in Abhängigkeit von der Temperatur**



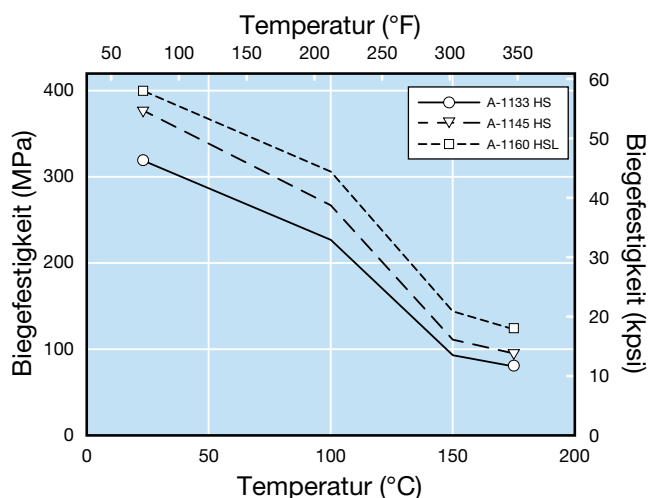
**Abbildung 22: Biegemodul von GF-PPA-Polymeren in Abhängigkeit von der Temperatur**



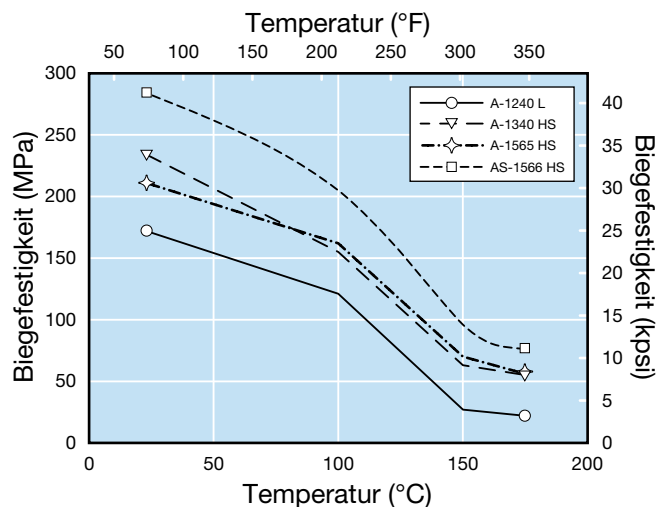
### Biegeeigenschaften bei hohen Temperaturen

Die Abbildungen 21 und 22 zeigen die Biegeeigenschaften von drei glasfaserverstärkten Amodel-Typen mit den Grundpolymeren A-1000, A-4000 und A-6000 im Bereich zwischen Raumtemperatur und 175 °C. Der Kunststoff mit Grundpolymer A-1000 hat eine höhere Festigkeit und Steifigkeit bei Raumtemperatur, bei Temperaturen oberhalb von 125 °C liefern jedoch die Typen mit den Grundpolymeren A-4000 und A-6000 bessere Werte.

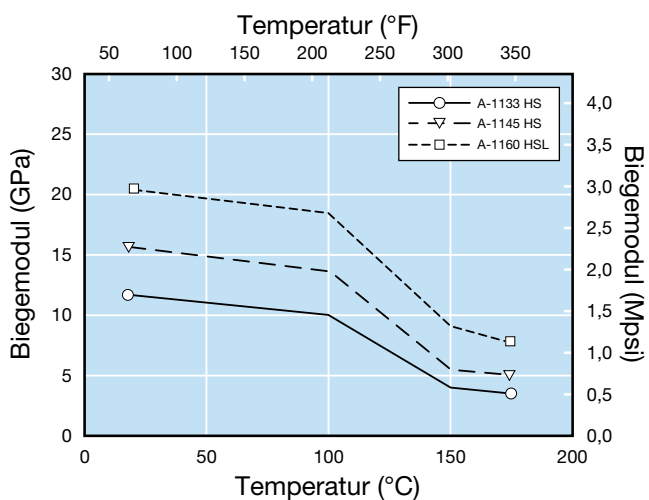
**Abbildung 23: Biegefestigkeit von GF-A-1000-PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur**



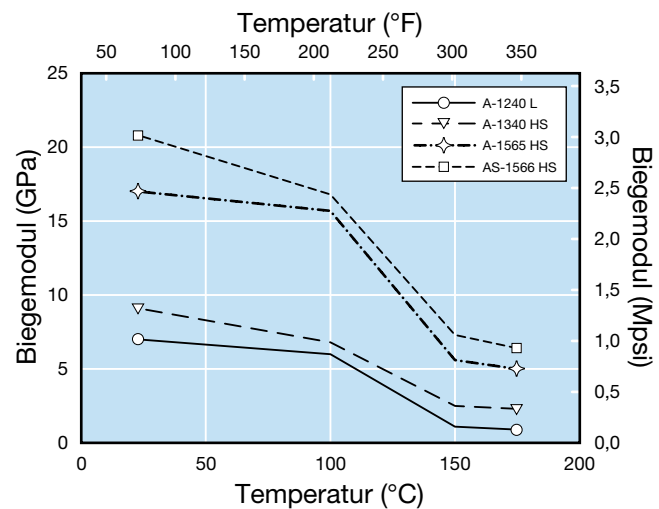
**Abbildung 25: Biegefestigkeit von mineral-/glasfaserverstärkten PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur**



**Abbildung 24: Biegemodul von GF-A-1000-PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur**



**Abbildung 26: Biegemodul von mineral-/glasfaserverstärkten PPA-Typen in Abhängigkeit von der Temperatur**



Die Abbildungen 23 und 24 zeigen die Biegeeigenschaften von Amodel-PPA-Kunststoffen mit dem Grundpolymer A-1000 und verschiedenen Glasfasergehalten. Erwartungsgemäß haben die Typen mit höherem Glasfasergehalt im gesamten Temperaturbereich die höheren Festigkeits- und Steifigkeitswerte.

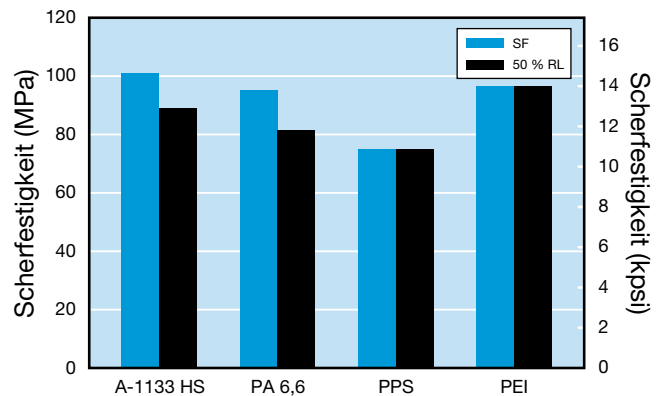
## Scherverhalten

Die Scherfestigkeit ist der Widerstand gegen Bruch von zwei Ebenen, die sich in der Belastungsrichtung relativ zueinander bewegen. Die Scherfestigkeit kann auch als die maximale Belastung definiert werden, die benötigt wird, um den Probekörper abzuscheren, so dass sich die bewegte Ebene vollständig von der stationären Ebene löst. Scherfestigkeitswerte sind bei der Konstruktion tragender Teile von großer Bedeutung, da es sich in praktischen Anwendungen bei der maximalen Beanspruchung eines Teils häufig um eine Scherbeanspruchung handelt.

Die Scherfestigkeit wurde gemäß ASTM D732 bestimmt. Bei dieser Prüfung wird eine aus dem zu prüfenden Werkstoff geformte Platte auf ein Gestell mit einem kreisförmigen Loch gelegt. Ein kreisförmiger Stempel, dessen Durchmesser geringfügig kleiner ist als der des Loches im Gestell, wird durch die geformte Platte gestoßen, so dass eine runde Scheibe ausgestanzt wird. Die maximale Spannung wird als Scherfestigkeit bezeichnet und wird berechnet, indem die zum Abscheren des Probekörpers erforderliche Kraft durch die abgescherter Fläche (berechnet durch Multiplizieren des Lochumfangs mit der Dicke der Platte) dividiert wird.

In Abbildung 27 wird die Scherfestigkeit von Amodel-PPA mit den Werten von PA 6,6, PPS und PEI verglichen. Die Scherfestigkeit von Amodel-PPA ist vergleichbar mit der von PA 6,6 und PEI und höher als die von PPS.

Abbildung 27: Scherfestigkeit von Polymeren mit 30–33 % GF



## Druckfestigkeit und Druckmodul

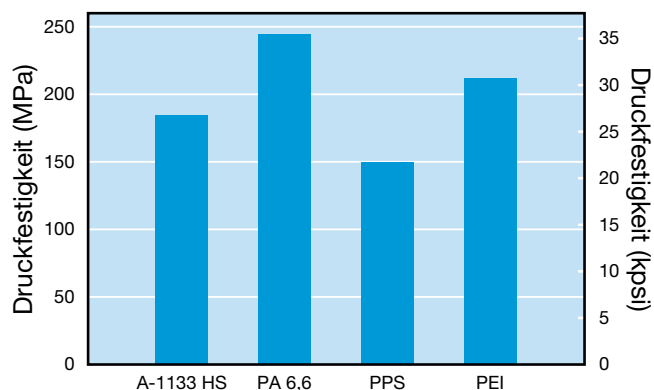
Druckfestigkeit und Druckmodul werden gemäß ASTM D695 gemessen. Der Probekörper wird aus dem zu prüfenden Werkstoff geformt und dann zwischen parallele Platten platziert. Diese Platten üben dann eine Druckkraft auf den Probekörper aus, wobei die Kraft und der Abstand zwischen den parallelen Platten überwacht werden. Die Stauchung entspricht der Änderung des Abstands zwischen den Platten. Die Bruchspannung (berechnet durch Dividieren der Kraft durch die Querschnittsfläche) ist die Druckfestigkeit und die Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kennlinie ist der Druckmodul.

## Schlagzähigkeit

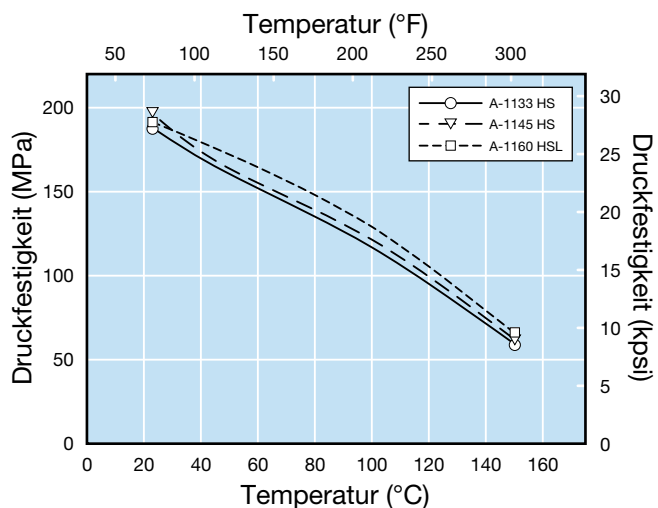
Da Polymere viskoelastisch sind, hängen ihre Eigenschaften von der Geschwindigkeit ab, mit der die Last aufgebracht wird. Bei höherer Belastungsgeschwindigkeit wird der Probekörper einer Schlagbelastung ausgesetzt. Wenn das Kunststoffteil den Aufprall ohne Schaden überstehen soll, muss es in der Lage sein, die beim Aufprall übertragene kinetische Energie zu absorbieren.

Die Fähigkeit eines Kunststoffteils, Energie zu absorbieren, hängt von seiner Form, seiner Größe, seiner Dicke und der Art des Kunststoffes ab, aus dem es hergestellt ist. Die am häufigsten verwendeten Methoden zur Bestimmung der Schlagfestigkeit liefern dem Konstrukteur nicht unbedingt Informationen, die bei einer Analyse verwendet werden können. Diese Tests dienen eher der Bestimmung der relativen Schlagfestigkeit und dem Vergleich der Kerbempfindlichkeiten unterschiedlicher Werkstoffe. Auch wenn anhand dieser Ergebnisse die praktische Zähigkeit in realen Anwendungen nur schlecht vorhergesagt werden kann, können sie durchaus für Vergleiche von Werkstoffen herangezogen werden.

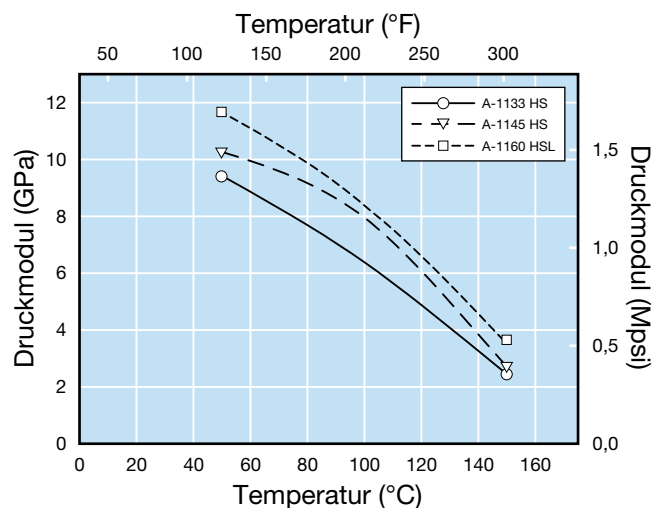
**Abbildung 28: Druckfestigkeit von Polymeren mit 30–33 % GF**



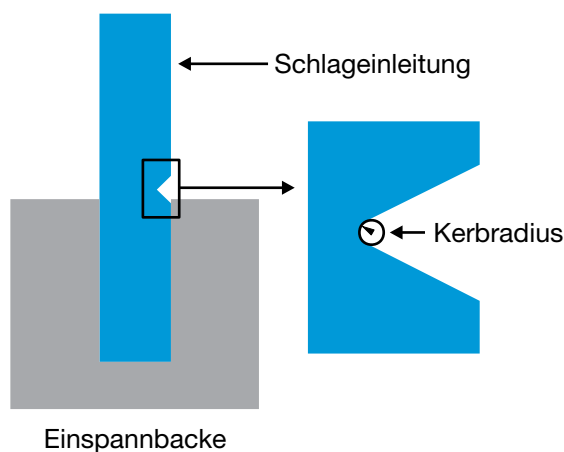
**Abbildung 29: Druckfestigkeit von A-1000-Polymeren in Abhängigkeit von der Temperatur**



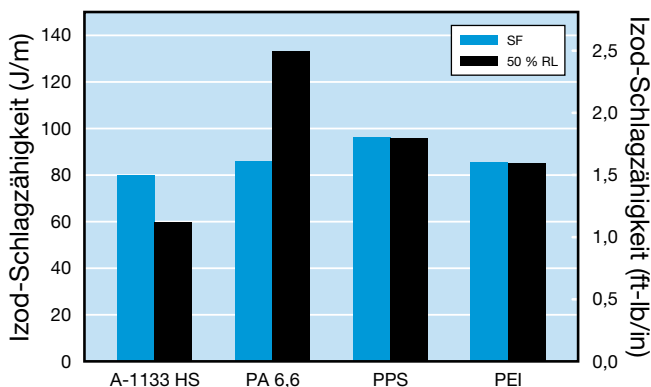
**Abbildung 30: Druckmodul von A-1000-Polymeren in Abhängigkeit von der Temperatur**



**Abbildung 31: Probekörper für Izod-Schlagzähigkeit**



**Abbildung 32: Izod-Schlagzähigkeit von Polymeren mit 30–33 % GF (ASTM D256)**



**Tabelle 16: Probekörperabmessungen für Izod-Schlagzähigkeit**

Abmessung	ISO 180		ASTM D256	
	mm	Zoll	mm	Zoll
Länge	80,00	3,150	63,50	2,500
Breite	10,00	0,394	12,70	0,500
Dicke	4,00	0,157	3,20	0,125
Kerbradius	0,25	0,010	0,25	0,010

### Izod-Schlagzähigkeit (einseitig eingespannter Balken)

Die Izod-Schlagzähigkeit kann gemäß ASTM D256 „Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Materials“ oder gemäß ISO 180 „Kunststoffe – Bestimmung der Izod-Schlagzähigkeit“ bestimmt werden. Bei beiden Prüfmethoden wird ein Probekörper (siehe Abbildung 31), dem eine Kerbe mit vorgeschriebenem Radius in seine Kante geschnitten wurde, einem Pendelschlag ausgesetzt. Nach dem Aufprall schwingt das Pendel weiter, jedoch mit weniger Kraft. Die Prüfmethoden unterscheiden sich in den Abmessungen des Probekörpers sowie in der Berechnung der Ergebnisse. Bei ASTM D256 wird die verbrauchte Schlagarbeit durch die nach der Einkerbung verbleibende Breite des Probekörpers dividiert. Das Ergebnis wird in Joule pro Meter (J/m) ausgedrückt. Bei ISO 180 wird die verbrauchte Schlagarbeit mit 1000 multipliziert und durch das Produkt der verbleibenden Breite und der Probekörperdicke dividiert. Das Ergebnis wird in Kilojoule pro Quadratmeter (kJ/m<sup>2</sup>) ausgedrückt.

Der Izod-Schlagzähigkeitstest kann auch mit ungekerbten Probekörpern durchgeführt werden. Die entsprechenden Prüfmethoden sind ASTM D4812 bzw. ISO 180U. Der Hauptunterschied zwischen diesen Methoden und den Methoden mit gekerbtem Probekörper besteht darin, dass bei der Ergebnisberechnung die volle Breite des Probekörpers verwendet wird.

In diesem Handbuch werden Werte für beide Methoden angegeben. Die Abmessungen der Probekörper sind in Tabelle 16 aufgeführt.

### Vergleich der Izod-Schlagzähigkeit

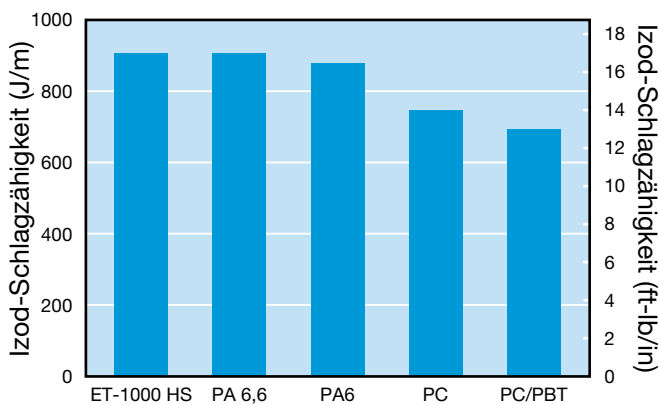
In Abbildung 32 wird die Izod-Kerbschlagzähigkeit von Amodel-PPA mit 33 % Glasfaserverstärkung mit der Izod-Kerbschlagzähigkeit von glasfaserverstärkten PA 6,6-, PPS- und PEI-Typen verglichen. Die Glasfaserverstärkung verleiht den Werkstoffen zusätzliche Festigkeit, reduziert jedoch die Dehnung. Alle Materialien weisen daher niedrige Izod-Schlagzähigkeitswerte auf. Bei PA 6,6 nimmt die Schlagzähigkeit durch die Feuchtigkeitsaufnahme zu.

Abbildung 33 zeigt die Izod-Schlagzähigkeit eines schlagzähmodifizierten Amodel-PPA-Typs (ET-1000 HS) und die Izod-Schlagzähigkeit von schlagzähem PA 6,6- und PA 6-Typen sowie von Polycarbonat (PC) und einem Polycarbonat-Polyester-Blend (PC/PBT). Die Schlagzähigkeit von Amodel ist vergleichbar mit oder besser als die der übrigen Werkstoffe. Abbildung 34 zeigt, dass dieser Kunststoff nicht so kerbempfindlich ist wie die meisten anderen amorphen Polymere.

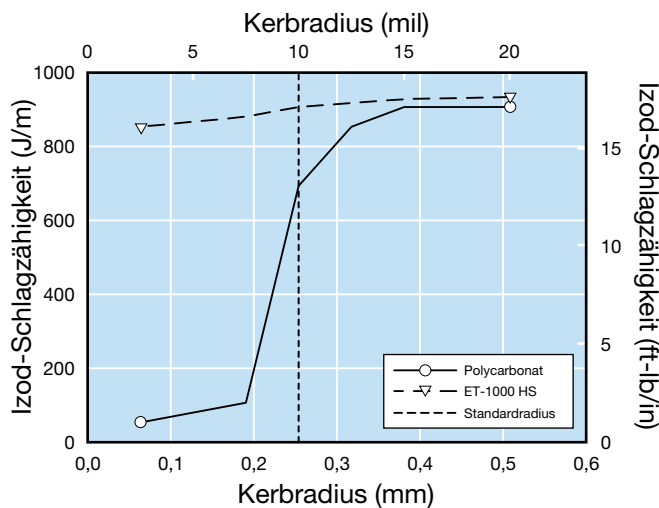
Abbildung 35 zeigt, dass ET-1000 HS bei Temperaturen unterhalb der Raumtemperatur eine gute Izod-Schlagzähigkeit aufweist. Die Schlagzähigkeit von Amodel AT-1001 L ist jedoch bei Temperaturen bis zu –40 °C besser.



**Abbildung 33: Izod-Schlagzähigkeit von Amodel ET-1000 im Vergleich mit PA und PC**



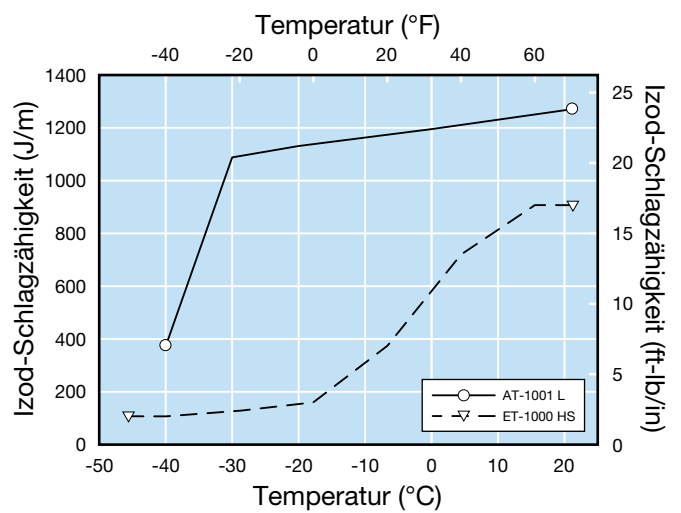
**Abbildung 34: Kerbempfindlichkeit von ET-1000 HS und PC**



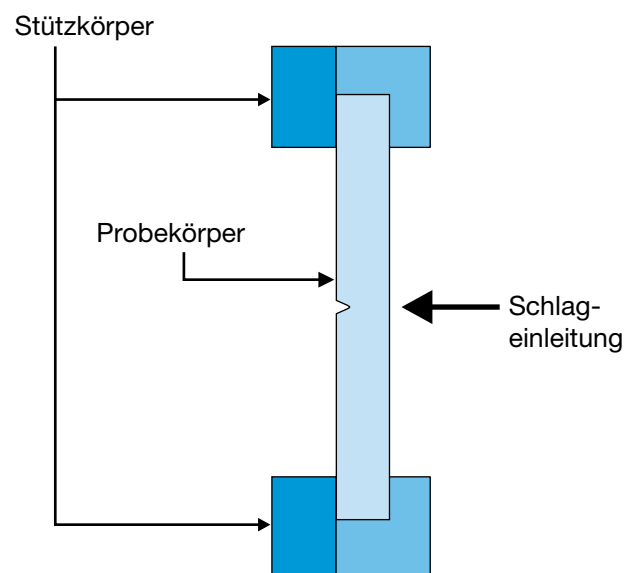
### Charpy-Schlagzähigkeit (gelagerter Balken)

Der Charpy-Test ähnelt dem Izod-Test, da auch hier ein Probekörper einem Pendelschlag ausgesetzt wird und die beim Brechen des Probekörpers verbrauchte Schlagarbeit gemessen wird. Der Hauptunterschied besteht darin, dass beim Charpy-Test der Probekörper an beiden Enden gestützt wird und der Pendelschlag in der Mitte auftrifft (siehe Abbildung 36). Die verwendeten Prüfmethode waren ISO 179/1eA und 179/1eU.

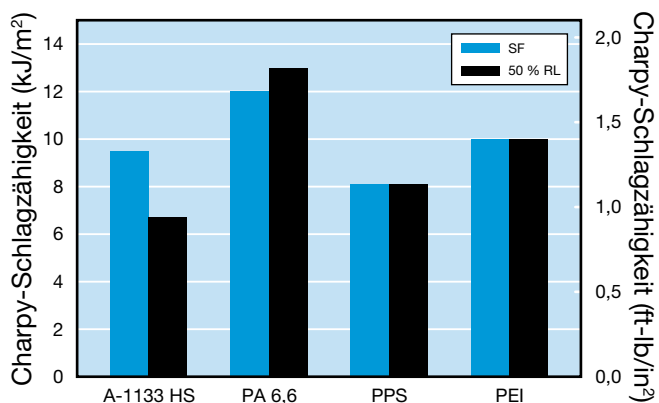
**Abbildung 35: Izod-Schlagzähigkeit von Amodel-PPA bei tiefen Temperaturen**



**Abbildung 36: Probekörper für den Charpy-Schlagzähigkeitstest**



**Abbildung 37: Charpy-Kerbschlagzähigkeit von Polymeren mit 30–33 % GF**



### Falltest-Stoßverhalten

Die praktische Zähigkeit von Amodel-Polyphthalamid-Polymeren wurde gemäß ASTM D3763 „High-Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors“ gemessen.

Bei diesem Test wird ein spritzgegossener Probekörper über einem Loch mit 76 mm Durchmesser eingespannt. Dann wird ein Fallgewicht aus einer vorgegebenen Höhe fallen gelassen, um eine bestimmte Aufschlaggeschwindigkeit zu erzielen. Das Fallgewicht besteht aus einem Stahlstab mit 12,7 mm Durchmesser und einem halbkugelförmigen Ende. Das Fallgewicht ist an einer Kraftmesszelle angebracht, die die Arbeit misst, die zum Durchstoßen eines Probekörpers benötigt wird.

Probekörper können spröde oder duktil versagen. Beim duktilen Versagen wird der Probekörper dauerhaft entsprechend der Form des Fallgewichts verformt, bleibt jedoch nach dem Durchstoß des Fallgewichts ganz. Beim spröden Versagen reicht die Duktilität des Probekörpers für eine Verformung ohne Versagen nicht aus. Daher zerbricht er beim Auftreffen des Fallgewichts in zwei oder mehr Teile.

Auch wenn die Schlagfähigkeitswerte auf ähnliche Weise wie bei der Prüfmethode ASTM D3029 (Gardner-Schlagtest) erzielt werden, wird diese Methode bevorzugt, da die Messung und Auswertung des instrumentierten Tests mithilfe einer computergesteuerten Datenverdichtung erfolgen und weniger Probekörper benötigt werden.

**Tabelle 17: Durchstoßverhalten (ASTM D3763) von schlagzähmodifiziertem PPA**

Typ	Zustand	Max. Belastung		Gesamtarbeit	
		N	lb	J	ft-lb
AT-1001 L	SF	4900	1100	54	40
AT-1002 HS	SF	4400	1000	54	40
AT-1002 HS	50 % RL	4000	900	47	35
AT-5001	SF	4400	1000	54	40
AT-5001	50 % RL	4000	900	50	37
ET-1000 HS	SF	4670	1050	54	40
ET-1001 L	SF	5600	1260	64	47

### Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl)

Die Poisson-Zahl ist ein Maß für die Dehnung eines Materials in der Richtung quer zur Belastungsrichtung. Sie entspricht dem Verhältnis der Querverformung zur Längsverformung innerhalb der Proportionalitätsgrenze. Beispiel: Ein zylindrischer Stab wird einer Zugspannung ausgesetzt. Die Länge (L) nimmt zu und gleichzeitig nimmt der Durchmesser (D) ab.

In diesem Fall wird die Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl) ( $\nu$ ) folgendermaßen berechnet:

$$\nu = \frac{-\frac{\Delta D}{D}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

Die meisten Kunststoffe haben eine Poisson-Zahl zwischen 0,3 und 0,5.

In Tabelle 18 sind die Poisson-Zahlen für verschiedene Amodel-Typen bei 23 °C im spritzfrischen Zustand aufgeführt.

**Tabelle 18: Poisson-Zahl für Amodel-Produkte**

Typ	Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl) – $\nu$
ET-1000 HS	0,40
A-1115 HS	0,41
AS-1133 HS	0,41
AS-1145 HS	0,41
A-1230 L	0,31
A-1240 L	0,29
A-1340 HS	0,38

### Mechanische Langzeiteigenschaften

Damit ein aus einem Polymer gefertigtes technisches Bauteil während seiner gesamten erwarteten Lebensdauer ein Verhalten innerhalb vorgegebener Parameter zeigen kann, muss der Konstrukteur die Langzeitauswirkungen mehrerer Faktoren in Betracht ziehen. Es müssen dabei verschiedene Belastungen sowie Änderungen der Eigenschaften infolge von Umwelteinflüssen berücksichtigt werden. Für die Beurteilung der zeitabhängigen Auswirkungen von Belastungen auf die Eigenschaften von Polymeren werden das Kriech- und das Ermüdungsverhalten gemessen. Das Verhalten eines technischen Bauteils kann außerdem durch eine Vielzahl verschiedener Umgebungseinflüsse beeinträchtigt werden. Dieses Thema wird im Abschnitt „Beständigkeit gegen Umgebungseinflüsse“ ab Seite 58 ausführlich behandelt. Gewisse Umgebungseinflüsse sind jedoch derart tiefgreifend, dass es angebracht ist, sie in diesem Abschnitt zu erläutern. Es handelt sich um die Auswirkungen von Feuchtigkeitsaufnahme und der Langzeiteinwirkung hoher Umgebungstemperaturen.

Dieser Abschnitt enthält Daten, die ermittelt wurden, um Konstrukteure bei der Analyse der Lebensdaueranforderungen zu unterstützen. Dazu gehören:

- Kriechmodul bei Zug-, Biege- und Druckbelastung
- Kriechbruch unter Zugbelastung
- Dauerfestigkeit
- Änderungen von Eigenschaften infolge von Feuchtigkeitsaufnahme
- Dimensionsänderungen infolge von Feuchtigkeitsaufnahme
- Änderungen von Eigenschaften infolge der Langzeiteinwirkung hoher Temperaturen

Die in diesem Handbuch angegebenen Langzeit-Materialeigenschaften wurden ermittelt, um Eigenschaftstrends und -verluste für eine Reihe von Amodel-PPA-Typen unter verschiedenen repräsentativen Bedingungen aufzuzeigen. Aufgrund des zur Erfassung dieser Daten benötigten Zeitaufwands können nicht alle Typen und Bedingungen berücksichtigt werden. Die Daten sollen Trends als Funktion von Füllstoff-/Verstärkungssystemen aufzeigen, damit Konstrukteure fundierte Entscheidungen treffen können.

In manchen Fällen wurden Daten zu Langzeiteigenschaften unter sogenannten „beschleunigten“ Prüfbedingungen bestimmt, um die Datengewinnung voranzutreiben. Bei der Beurteilung derart bestimmter Daten ist mit Vorsicht vorzugehen, da deren Verhalten häufig nichtlinear ist. Das trifft besonders dann zu, wenn ein Eigenschaftsverlust in Abhängigkeit von erhöhter Temperatur und/oder chemischen Einflüssen gemessen wird. Thermische „Schwellenwerte“, wie etwa die Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) und letztendlich der Schmelzpunkt, tragen am meisten zu diesem nichtlinearen Verhalten bei.

### Kriechverhalten

Wenn ein Material einer Belastung ausgesetzt wird, tritt sofort eine Dehnung auf. Bei kleinen Dehnungen ist die Dehnung proportional zur Spannung und kann anhand des entsprechenden Moduls berechnet werden. Wird die Belastung über einen längeren Zeitraum ausgeübt, kann eine zusätzliche Dehnung auftreten. Dieses Verhalten wird als „Kriechen“ bezeichnet und die zusätzliche Dehnung als „Kriechdehnung“.

Metalle weisen ebenfalls Kriechverhalten auf, doch ist das Phänomen bei Kunststoffen von größerer Bedeutung. Ihr geringerer Modul bedeutet, dass bei gleichem Spannungsniveau die Dehnung größer ist und einen höheren Anteil der Bruchdehnung ausmacht. Allgemein gilt, je näher die Anfangsdehnung bei der Bruchdehnung liegt, desto wahrscheinlicher ist es, dass die Kriechneigung hoch ist.

Das Kriechverhalten muss bei der Konstruktion berücksichtigt werden, damit das Teil seine Aufgabe langfristig zufriedenstellend erfüllt. Zuerst muss festgestellt werden, ob das Kriechverhalten einen maßgeblichen Einfluss auf die Abmessungen oder auf die Funktion des Teils hat. Wenn die Spannungswerte so niedrig sind, dass nur unwesentliche Dimensionsänderungen auftreten, kann das Kriechverhalten vernachlässigt werden. Bei Spannungswerten, die so hoch sind, dass die Kriechneigung zu unzulässigen Verformungen führen würde, muss jedoch eine andere Konstruktion in Betracht gezogen werden. Dazu kann die Verwendung eines Werkstoffes mit höherem Kriechmodul geprüft oder eine andere Konstruktionsweise ausgewählt werden, wie z. B. mit einem Metalleinsatz als tragendes Element. Für weitere Ausführungen zu diesem Thema siehe den Abschnitt „Konstruktionsinformationen“.

Glasfaser- und mineral-/glasfaserverstärkte Typen haben allgemein eine geringere Kriechneigung als unverstärkte Typen. Die bis zum Eintreten messbarer Kriechwerte benötigte Zeit ist bei den unverstärkten Typen ebenfalls kürzer. Der Schein- oder Kriechmodul nimmt bei hohen Temperaturen ab, was zu einer entsprechenden Zunahme der Kriechneigung führt. Bei Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) ist der Scheinmodul der unverstärkten Typen so gering, dass selbst relativ geringe Belastungen zu erheblichen Kriechwerten führen können. Aus diesem Grund werden die unverstärkten Typen normalerweise nicht für den Einsatz im Bereich struktureller Bauteile oberhalb dieser Temperaturen empfohlen. Für Strukturbauteile, die hohen Temperaturen ausgesetzt werden, sollten glasfaser- oder mineral-/glasfaserverstärkte Typen spezifiziert werden.

Kriechverhalten kann unter Zug-, Druck- oder Biegebelastung auftreten. Daher wird zur Bestimmung des Kriechverhaltens die Dehnung in Abhängigkeit von der Zeit gemessen, während ein Probekörper bei vorgegebenen Umgebungsbedingungen einer konstanten Zug-, Druck- oder Biegebelastung ausgesetzt wird. Das angewandte Verfahren ist in ASTM D2990 „Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics“ beschrieben. Die Prüfmethode ISO 899 „Kunststoffe – Bestimmung des Kriechverhaltens“ ist ähnlich, liefert jedoch aufgrund der Unterschiede beim Probekörper nicht unbedingt die gleichen Ergebnisse. Die mit den beiden Methoden aufgezeigten allgemeinen Trends müssten vergleichbar sein, direkte Werkstoffvergleiche sollten jedoch nur anhand von Daten angestellt werden, die mit derselben Methode ermittelt wurden.

Der normale Verlauf des Kriechens umfasst drei Stufen:

- Rasche Anfangsverformung
- Weitere Verformung mit langsamer und konstanter Geschwindigkeit
- Erreichen der Streckgrenze, gefolgt vom Bruch bei duktilen Werkstoffen bzw. Bruch für nicht-duktilen Werkstoffe

Die Bedeutung der im Kriechversuch ermittelten Daten besteht darin, dass sie zur Berechnung der zeitabhängigen Kriechdehnung und des Kriechmoduls verwendet werden können, die bei der Spannungsberechnung und zur Bestimmung sicherer Spannungswerte für bestimmte Zeit- und Temperaturbedingungen herangezogen werden. Werden bei verschiedenen Spannungswerten Kriechversuche bis zum Bruch durchgeführt, kann eine Kriechbruchkurve erstellt werden.

Es gibt einen weiteren Aspekt des Kriechverhaltens, der die Analyse noch komplizierter machen kann: bei gegebener Spannung tritt Kriechverhalten mit der erwarteten Geschwindigkeit gemäß dem Scheinmodul auf. Je nachdem, wie die Spannung aufgebracht wird, kann das anfängliche Kriechen jedoch zu einem Spannungsabbau führen. Beispiel: Ein Kunststoffteil wird mit einer Schraube befestigt, die so festgezogen wird, dass im Kunststoff eine Druckspannung entsteht. Mit zunehmender Kriechdehnung nimmt die Druckspannung ab, wodurch die Kriechneigung verringert wird. Die Druckspannung nimmt ab, bis bei einem niedrigeren Spannungswert ein Gleichgewicht erreicht wird. Eine „Einzelstellenanalyse“ würde ergeben, dass das Anzugsmoment bis zum Versagen abnimmt, in Wirklichkeit stellt sich jedoch vor dem Versagen ein zulässiges Gleichgewicht ein.

Für weitere Informationen zum Einfluss des Kriechverhaltens auf die Teilekonstruktion (einschließlich Beispielen) siehe Seite 70.

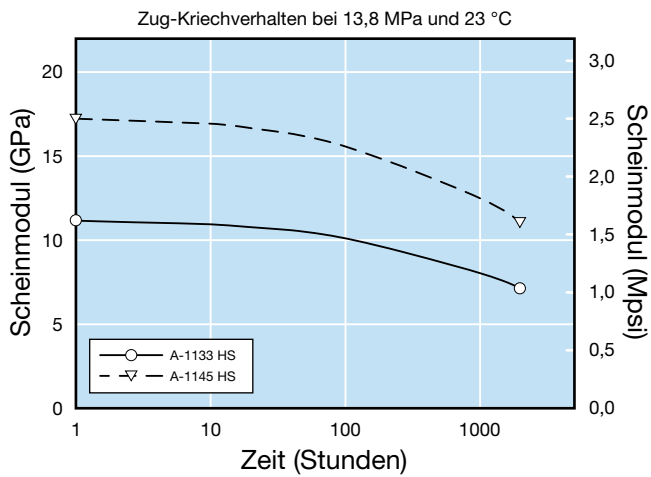
### Zug-Kriechverhalten

Das Zug-Kriechverhalten wurde bei drei Temperaturen – 23 °C, 125 °C und 175 °C – sowie bei zwei Spannungswerten – 13,8 MPa und 34,5 MPa – gemessen. Als Probekörper wurden 3,2 mm dicke spritzgegossene Zugstäbe gemäß ASTM D638 Typ I verwendet. Die Probekörper wurden im „spritzfrischen“ Zustand geprüft. Die bei den zwei höheren Temperaturen geprüften Probekörper wurden in Umluftöfen gelegt. Obwohl die Dehnung gemessen wird, wird als Ergebnis in der Regel der Scheinmodul angegeben, der durch Dividieren der Dehnung durch die aufgebrachte Spannung berechnet wird. Der Scheinmodul ist der Wert, der für die mechanischen Berechnungen bei der Konstruktion von Teilen verwendet wird, die Dauerbelastungen ausgesetzt werden.

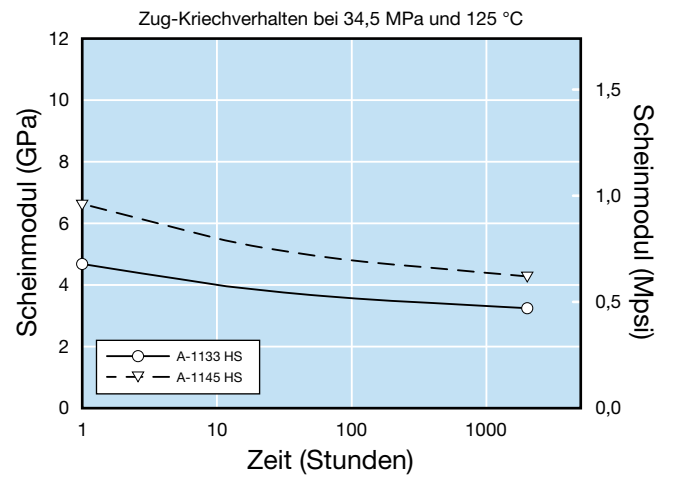
Die Werkstoffe A-1133 HS (33 % GF) und A-1145 HS (45 % GF) wurden geprüft. Die Ergebnisse der Tests bei Raumtemperatur sind in den Abbildungen 38 und 39 dargestellt.

Die Ergebnisse des Zug-Kriechversuchs bei 125 °C sind in den Abbildungen 40 und 41 und die bei 175 °C in den Abbildungen 42 und 43 dargestellt.

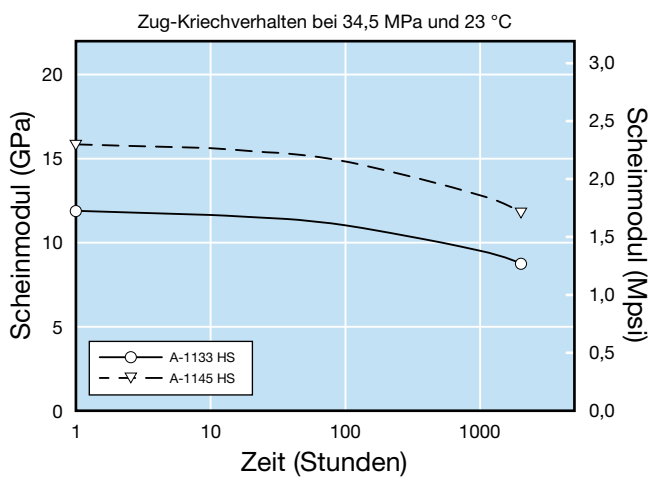
**Abbildung 38: Scheinmodul bei 23 °C und 13,8 MPa**



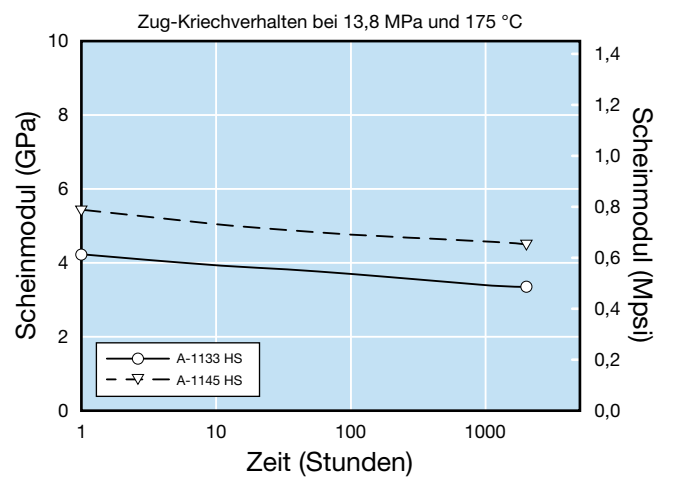
**Abbildung 41: Scheinmodul bei 125 °C und 34,5 MPa**



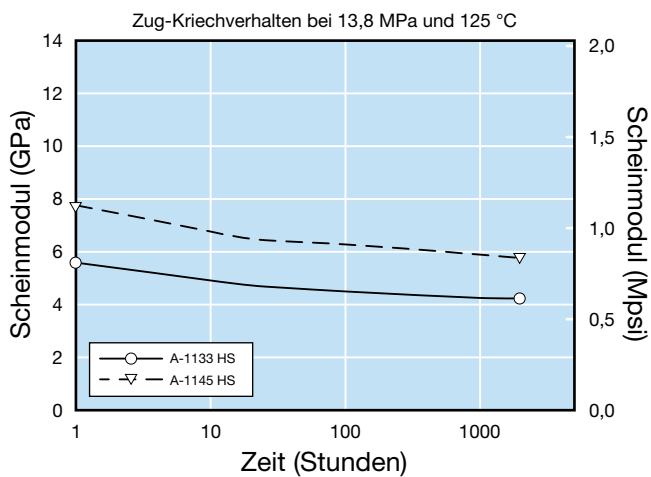
**Abbildung 39: Scheinmodul bei 23 °C und 34,5 MPa**



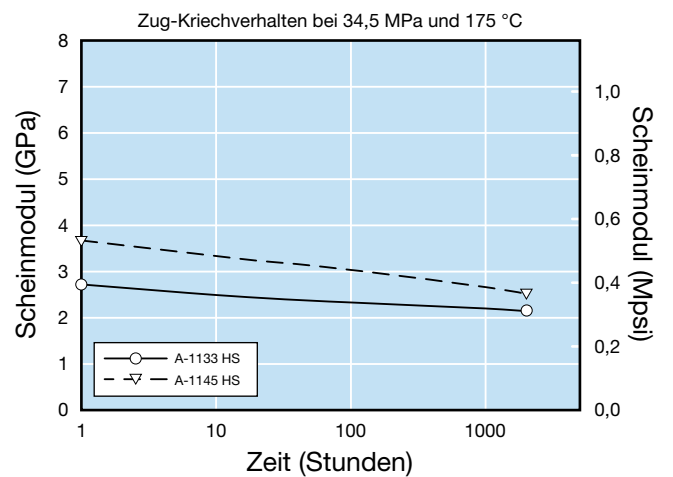
**Abbildung 42: Scheinmodul bei 175 °C und 13,8 MPa**



**Abbildung 40: Scheinmodul bei 125 °C und 13,8 MPa**



**Abbildung 43: Scheinmodul bei 175 °C und 34,5 MPa**



## Isochrone Spannungs-Dehnungs-Diagramme

Eine weitere Möglichkeit zur Darstellung des Kriechverhaltens sind isochrone (zeitgleiche) Spannungs-Dehnungs-Diagramme. Für ein isochrones Spannungs-Dehnungs-Diagramm werden die Spannungen und die resultierenden Dehnungen für ein einziges Zeitintervall aufgezeichnet und es wird eine glatte Kennlinie durch die Punkte gezogen. Dieses Verfahren wird für jedes Zeitintervall wiederholt.

Der Vorteil hierbei besteht in einer präzisen Zusammenfassung großer Datenmengen. Der Scheinmodul an einem beliebigen Punkt ergibt sich durch Dividieren der Spannung durch die angegebene Dehnung. (Hinweis: Die Abbildungen zeigen in Prozent ausgedrückte Dehnwerte. Die eigentliche Dehnung ist der aufgetragene Wert dividiert durch 100.)

Die isochronen Spannungs-Dehnungs-Kennlinien für Amodel A-1133 HS bei 23 °C, 125 °C und 175 °C sind in Abbildung 44 dargestellt.

Abbildung 45 zeigt die gleichen Daten für Amodel A-1145 HS. Wie erwartet nimmt die Kriechneigung mit zunehmendem Glasfasergehalt des Compounds ab.

## Kriechbruch unter Zugbelastung

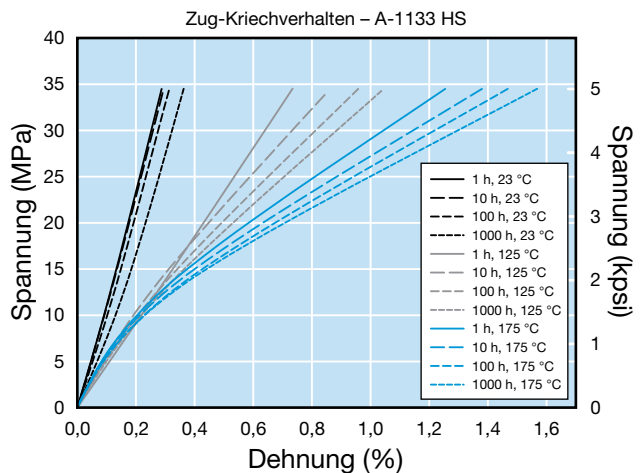
Kriechbruch ist definiert als Materialversagen bzw. -bruch als Folge einer Dauerbelastung. Da bei einer Dauerbelastung der Bruch bei einem niedrigeren Spannungswert eintritt als der Kurzzeitfestigkeit, kann der Kriechbruchwert bei der Konstruktion der begrenzende Faktor sein.

Das Ziel des Zug-Kriechbruchversuches ist die Bestimmung der Zeit, die erforderlich ist, bis eine Dauerbelastung zum Bruch führt. Eine Kennlinie der Spannung in Abhängigkeit von der Zeit bis zum Bruch wird üblicherweise als „Kriechbruch-Hüllkurve“ bezeichnet. Da die Festigkeit eines Materials von der Temperatur abhängt, kann für jede gewünschte Temperatur eine „Kriechbruch-Hüllkurve“ erzeugt werden.

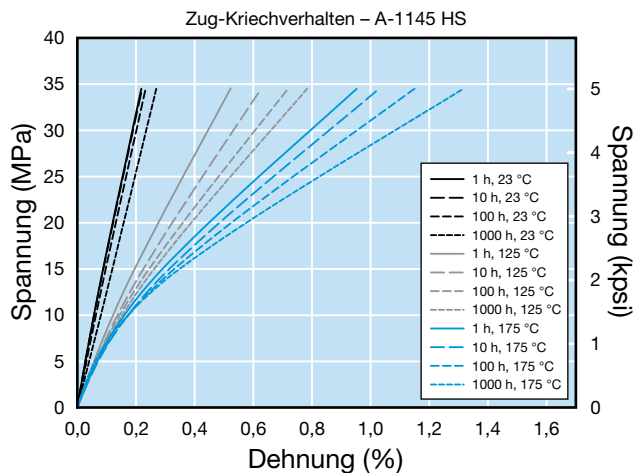
Kriechbruch-Hüllkurven wurden gemäß ASTM D2990 entwickelt. Als Zugprobekörper wurden 3,2 mm dicke spritzgegossene Zugstäbe gemäß ASTM D638 Typ I verwendet. Die Umgebungsbedingungen waren die gleichen wie beim vorstehenden Zug-Kriechversuch. An die Probekörper wurde mit druckluftbetätigten Dehngefäßen eine Zugbelastung angelegt, um die angegebenen Spannungswerte aufrecht zu erhalten.

Die Kriechbruch-Hüllkurven bei Zugbelastung für Amodel AS-1133 HS sind in Abbildung 46 für 65, 100 und 150 °C dargestellt.

**Abbildung 44: Isochrones Spannungs-Dehnungs-Diagramm für A-1133 HS PPA**

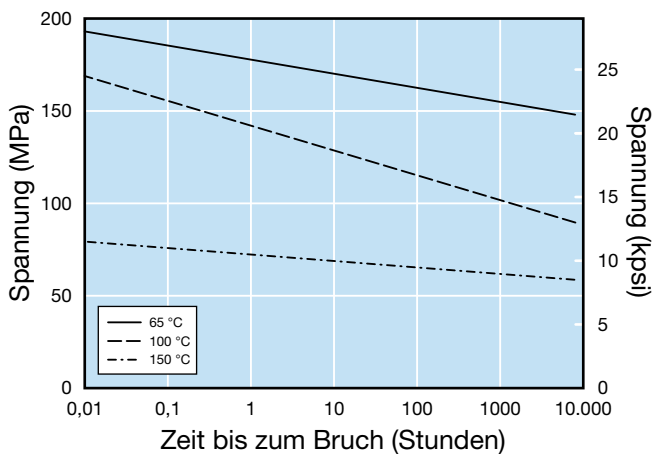


**Abbildung 45: Isochrones Spannungs-Dehnungs-Diagramm für A-1145 HS PPA**

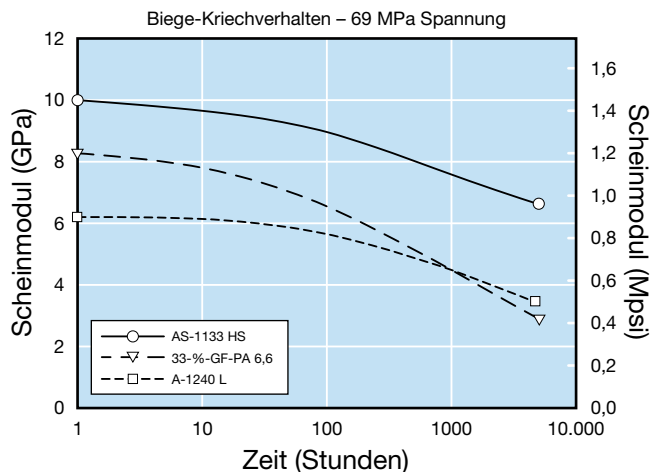




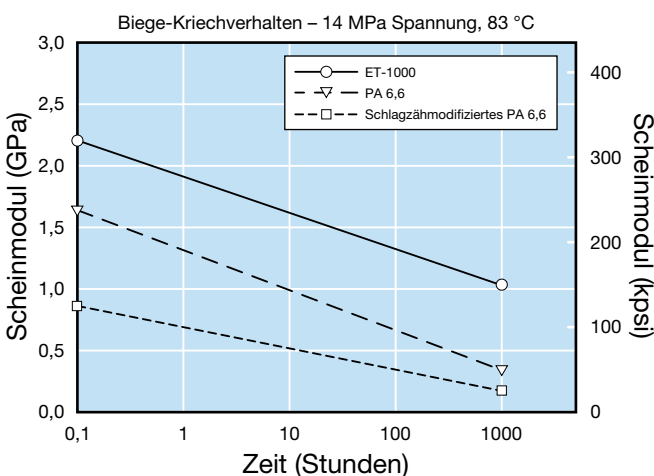
**Abbildung 46: Kriechbruch unter Zugbelastung für AS-1133 HS**



**Abbildung 47: Biege-Scheinmodul bei 69 MPa und 23 °C**



**Abbildung 48: Biege-Scheinmodul bei 14 MPa und 83 °C**



## Biege-Kriechverhalten

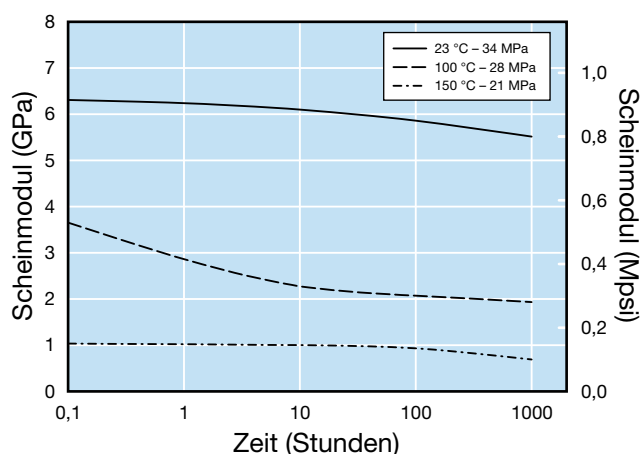
Das Biege-Kriechverhalten wurde gemäß ASTM D2990 unter Verwendung der Dreipunktbiegung mit einer Spannweite von 50,8 mm bestimmt. Als Probekörper wurden spritzgegossene Stäbe mit den Maßen 127 mm x 12,7 mm x 3,2 mm verwendet, die im spritzfrischen Zustand geprüft wurden. Es wurde eine konstante relative Luftfeuchtigkeit von 50 % sowie eine Temperatur von 23 °C aufrechterhalten. Anhand der Kennlinien der Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur wurden Spannungswerte bestimmt, die 25–35 % der maximalen Festigkeit des Materials bei der Prüftemperatur entsprachen.

Die Kriechfestigkeit lässt sich zu einem großen Teil anhand des Verhältnisses der Anwendungstemperatur zur Glasübergangstemperatur des Materials vorhersagen. Normalerweise ist die Kriechneigung bei Anwendungstemperaturen weit unterhalb von  $T_g$  gering und nimmt zu, je mehr sich die Anwendungstemperatur  $T_g$  nähert. Es ist daher nicht überraschend, dass Amodel-Polymere eine geringere Kriechneigung aufweisen als viele herkömmliche teilkristalline Thermoplaste. Amodel A-1000 hat beispielsweise eine Glasübergangstemperatur von 123 °C, die mit dem DSC-Verfahren (Differential Scanning Calorimetry [ASTM D3418]) bestimmt wurde. Die entsprechende  $T_g$  für PA 6,6 beträgt 65 °C. Bei allen Temperaturen bis zur  $T_g$  haben Amodel-Polymere eine sehr geringe Kriechneigung.

In Abbildung 47 wird der Biege-Scheinmodul von Amodel AS-1133 HS und A-1240 L mit dem von 33-%-glasfaserverstärktem PA 6,6 verglichen. Während das Polymer AS-1133 HS dem glasfaserverstärkten PA eindeutig überlegen ist, hat sogar der mineralstoffgefüllte Typ – Amodel A-1240 – nach 1000 Stunden einen höheren Kriechmodul.

In Abbildung 48 wird der Biege-Scheinmodul von Amodel ET-1000 mit dem unverstärkter und schlagzähmodifizierter PA 6,6-Typen bei 83 °C und 14 MPa verglichen.

**Abbildung 49: Druck-Scheinmodul von AS-1133 HS**



### Druck-Kriechverhalten

Das Druck-Kriechverhalten wurde gemäß ASTM D2990 bestimmt. Als Probekörper wurden spritzgegossene Stäbe mit den Maßen 12,7 mm x 12,7 mm x 25,4 mm verwendet. Die Enden der Stäbe wurden spanend bearbeitet, bis sie mit einer Toleranz von 0,025 mm parallel zueinander und senkrecht zur Achse waren. Die Verschiebung wurde mit aufgeklebten Dehnungsmessstreifen überwacht. Wie bei den Biegekriechversuchen betrugen die gewählten Spannungswerte weniger als 35 % der Druckfestigkeit bei der Testtemperatur.

Abbildung 49 zeigt die Druck-Kriechmodule von Amodel AS-1133 HS bei 23 °C, 100 °C und 150 °C. Diese Module sind niedriger als die in Abbildung 47 angegebenen Biege-Kriechmodule. Das liegt an der geringeren Faserorientierung in der Richtung der erzeugten Spannung.

Bei den meisten Anwendungen, bei denen Amodel-Kunststoff einer Druckbelastung ausgesetzt wird, wird die Belastung quer zur Fließrichtung und damit quer zur Faserorientierung aufgebracht. Daher sind die hier angegebenen Scheinmodule repräsentativ für das Materialverhalten in typischen Anwendungen.

### Ermüdungsfestigkeit

Wird ein Werkstoff zyklischen Belastungen ausgesetzt, tritt Materialversagen oder -bruch bei Spannungswerten auf, die wesentlich niedriger als die Kurzzeit-Bruchfestigkeitswerte sind. Zyklische Belastung tritt u. a. in folgenden Beispielen auf: bei Teilen, die starken Schwingungen ausgesetzt sind, bei Bauteilen von Pendel- oder Drehvorrichtungen mit Wechselbelastung sowie bei mechanischen Vorrichtungen, wie z. B. Zahnrädern, deren Wechselbelastung ortsgebunden ist.

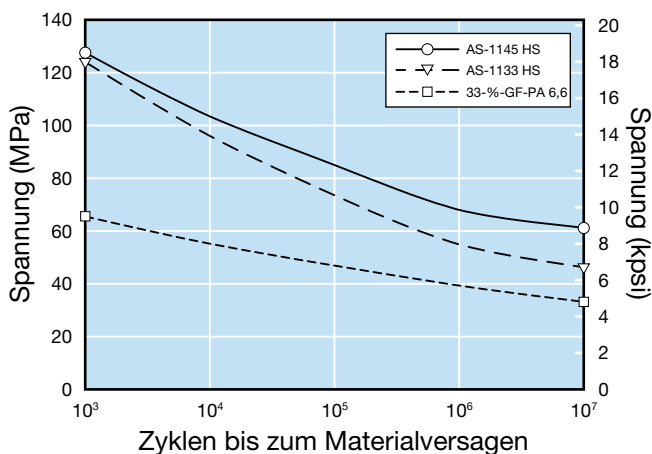
Bei Metallwerkstoffen ist dieses Phänomen wohl bekannt und Metallurgen haben den Begriff „Dauerfestigkeit“ definiert. Dieser Begriff steht für die maximale zyklische Belastung, der ein Werkstoff ausgesetzt werden kann, ohne zu versagen. Normalerweise entspricht dieser Spannungswert dem höchsten Spannungsniveau, das bei 10 Millionen ( $10^7$ ) Lastzyklen nicht zum Materialversagen führt.

Der Begriff „Dauerfestigkeit“ wird gelegentlich auch bei der Konstruktion von Kunststoffteilen verwendet. Die Reaktion von Kunststoffen auf zyklische Belastungen ist jedoch komplexer als die von Metallen und der Begriff ist nicht ganz passend. Ermüdungsdaten erhält man normalerweise durch Auftragen der Spannung in Abhängigkeit von der Anzahl der Belastungszyklen beim Bruch. Anschließend wird eine glatte Ausgleichskurve durch die Datenpunkte berechnet. Bei der Teilekonstruktion liefert dieses Dauerfestigkeitsdiagramm (Spannung in Abhängigkeit von der Zyklenanzahl) die entsprechenden Festigkeitswerte für die erforderliche Lebensdauer des Teils.

Bei der Konstruktion eines Teils, das einer Wechselbelastung ausgesetzt wird, sollten zuerst die Anforderungen an die Ermüdungsfestigkeit bestimmt werden. Eine Analyse dieser Ermüdungsfestigkeitsanforderungen wird jedoch durch eine Reihe von Faktoren, deren Auswirkung nicht unterschätzt werden darf, kompliziert. Zu diesen Faktoren gehören: die Form des Bauteils, Spannungskonzentrationsfaktoren, die Belastungsgeschwindigkeit, durch das Aufbringen der Belastung verursachte Temperaturänderungen, die Art der durch die Belastung hervorgerufenen Spannung (Zug, Druck oder Schub usw.), Umgebungsfaktoren (z. B. Chemikalien, Strahlung, Umgebungstemperatur), Eigenspannungen, der Arbeitszyklus und die erforderliche Lebensdauer des Teils.



**Abbildung 50: Biegeermüdung von GF-Polymeren bei 23 °C und 32 Hz**



### Ermüdungsfestigkeit von Amodel-Polymeren

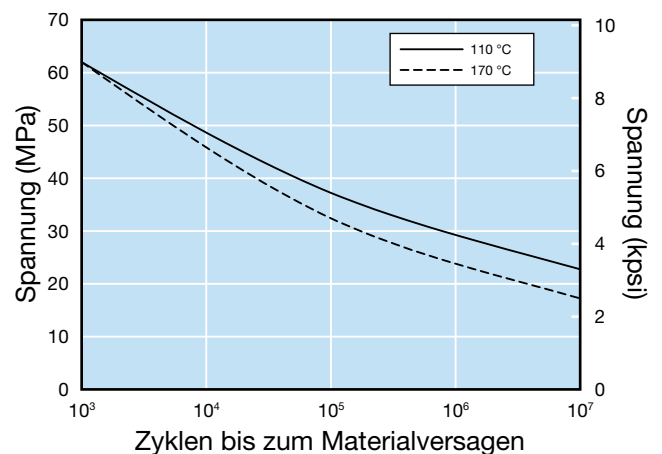
Bei der Messung und/oder bei einem Vergleich der Ermüdungsfestigkeit von Kunststoffen müssen unbedingt der Modul (Zug-, Druck- oder Biegemodul), die Frequenz und das Spannungsprofil spezifiziert werden.

Die Ermüdungsfestigkeit von Amodel-Polymeren wurde gemäß der Prüfmethode ASTM D671 bestimmt. Diese Methode nutzt einen einseitig eingespannten Balken mit konstanter Durchbiegung. Die in Abbildung 50 dargestellten Ergebnisse wurden bei einer Frequenz von 32 Hz ermittelt. Als Materialversagen wurde die Zahl der Lastwechsel definiert, bei der der Spannungswert auf 90 % seines Ausgangswerts abfällt. Die Amodel-Polymere sind gegen höhere Wechselbelastungen beständig als PA 6,6.

Abbildung 51 zeigt das Ermüdungsverhalten von Amodel AS-1145 HS bei 110 °C und 170 °C. Wie erwartet führt eine Erhöhung der Temperatur zu einer Abnahme der maximal erträglichen Wechsellastspannung.

Ein gutes Anwendungsbeispiel für zyklische Belastung ist ein Zahnrad. Wenn das antreibende Rad die Rotation des angetriebenen Rads bewirkt, wird nacheinander jeder Zahn belastet. Darauf folgt eine Phase niedriger oder überhaupt keiner Belastung. Bei der Konstruktion eines Zahnrads ist daher die Dauerfestigkeit des Werkstoffes unter den Betriebsbedingungen des Zahnrads das entscheidende Festigkeitskriterium.

**Abbildung 51: Biegeermüdung von AS-1145 bei hoher Temperatur**



Nachdem all diese Berechnungen abgeschlossen sind, kann die Teilekonstruktion entsprechend angepasst werden, um die Eigenschaften des ausgewählten Werkstoffes optimal zu nutzen. Umgekehrt kann auch der Materialtyp an die Anwendungsanforderungen angepasst werden. Ein äußerst nützliches Hilfsmittel zur Überprüfung einer Konstruktion ist die Finite-Elemente-Analyse (FEA). Bei der FEA wird das Teil elektronisch modelliert und die erwarteten Belastungen und Spannungen werden von einem Computerprogramm simuliert. Die resultierenden Dehnungswerte können ausgewertet und bei Bedarf Konstruktions- bzw. Werkstoffänderungen vorgenommen werden. Das FEA-Modell lässt sich wesentlich leichter ändern als ein gefertigtes Teil oder ein Formwerkzeug.

Selbst nach Abschluss der Berechnungen und FEA kann ein Werkstoff für ein dynamisch belastetes Bauteil am besten mithilfe eines Prototypentests beurteilt werden. Prototypen können durch spanende Bearbeitung aus vorhandenen Halbzeugen hergestellt und ihr Verhalten kann unter den Bedingungen der Anwendung geprüft werden. Halbzeuge sind normalerweise als extrudierte Platten oder Stäbe verfügbar und weisen im Allgemeinen etwas niedrigere mechanische Eigenschaften auf als das spritzgegossene Teil. Außerdem entstehen durch die spanende Bearbeitung normalerweise Spannungen, die in einem Spritzgussteil nicht vorhanden sind. Folglich ist eine erfolgreiche Prototypprüfung ein äußerst solider Indikator für die Zuverlässigkeit der Konstruktion.

## Auswirkungen von Feuchtigkeit

Wie bei den meisten Thermoplasten können aus Amodel hergestellte Teile Feuchtigkeit aus der Atmosphäre aufnehmen. Dabei handelt es sich um eine physikalische und keine chemische Veränderung, weshalb sie umkehrbar ist, d. h., Teile können unter den entsprechenden Bedingungen „getrocknet“ werden. Aufgrund des stark aromatischen Charakters ihrer Polymerhauptkette nehmen Amodel-Polyphthalamide viel weniger Feuchtigkeit auf als aliphatische Polyamide wie PA 6,6 und PA 6. Folglich werden die Dimensionsstabilität, Festigkeit und Steifigkeit von Amodel-Teilen durch die Aufnahme von Feuchtigkeit wesentlich weniger beeinträchtigt als die von Teilen aus herkömmlichem aliphatischem PA. Da Feuchtigkeit allgegenwärtig ist, ist das Wissen um die Auswirkungen von Feuchtigkeit auf die Eigenschaften eines Materials entscheidend, wenn es darum geht, die Anforderungen der Endanwendung zu erfüllen.

## Bedeutung der Feuchtigkeitsaufnahme

Wenn ein Polymer Luftfeuchtigkeit aufnimmt, können zahlreiche Veränderungen stattfinden. Natürlich nimmt das Gewicht des Teils zu und diese Gewichtszunahme wird normalerweise zur Messung der aufgenommenen Feuchtigkeitsmenge verwendet. Außerdem können Dimensionsänderungen – im Allgemeinen eine Zunahme – auftreten, d. h., die Teile werden größer. Die Anwesenheit verstärkender Füllstoffe, wie z. B. Glasfasern, kann zu anisotropen Dimensionsänderungen führen, da sich die Fasern beim Füllen des Werkzeugs in der Polymerfließrichtung ausrichten. Ähnlich wie die Formteilschwindung werden Dimensionsänderungen infolge von Feuchtigkeitsaufnahme häufig in Fließrichtung und quer zur Fließrichtung angegeben.

Die mechanischen Eigenschaften können ebenfalls von der Feuchtigkeitsaufnahme beeinflusst werden. Im Allgemeinen kommt es zu einer geringfügigen Abnahme der physikalischen Eigenschaften wie Zug- und Biegefestigkeit. Der jeweilige Modul nimmt ebenfalls leicht ab. Die Schlagzähigkeit nimmt tendenziell leicht zu, da die Anwesenheit von Feuchtigkeit das Polymer plastifizieren kann. Da Wasser leitfähig ist, kann sich die aufgenommene Feuchtigkeit nachteilig auf die Durchschlagfestigkeit eines Formteils auswirken.

Hersteller von Polymeren, die Feuchtigkeit aufnehmen, veröffentlichen normalerweise zwei Datensätze: einen, der die Testergebnisse von Probekörpern ohne aufgenommene Feuchtigkeit (üblicherweise als „spritzfrisch“ [SF] bezeichnet) angibt, und einen zweiten, für den Probekörper verwendet wurden, die in einer Umgebung mit 50 % relativer Luftfeuchtigkeit (bezeichnet als „50 % RL“) einen Gleichgewichtszustand erreicht haben. Polymere wie PA 6 und PA 6,6 nehmen Feuchtigkeit rasch auf und erreichen in einer Umgebung mit 50 % RL schnell ein Gleichgewicht. Die Ermittlung von Daten für 50 % RL für diese Materialien ist relativ einfach und für Konstruktionen von hoher Relevanz (wie nachstehend erläutert wird).

Dagegen nehmen Polymere wie Amodel-PPA Feuchtigkeit nur sehr langsam auf und es kann Jahre dauern, bis sie bei 50 % RL ein Gleichgewicht erreichen. Um Daten für 50 % RL angeben zu können, wurde eine Methode zur Beschleunigung der Konditionierung von Probekörpern entwickelt. Dabei werden die Probekörper in einer wässrigen Lösung aus Kaliumacetat gekocht, bis das Probekörpergewicht konstant bleibt. Das dauerte normalerweise einige Tage. Erwartungsgemäß hat dieses beschleunigte Verfahren einige Nebenwirkungen, die die Messwerte beeinflussen. Bei dem beschleunigten Verfahren werden die Probekörper getempert und Spannungen werden abgebaut, was praktisch zu einer Verbesserung der Materialeigenschaften führen kann. Im Gegensatz dazu kann der Kontakt mit kochendem Wasser zu einem gewissen Maß an Hydrolyse des Polymers führen, was einen Verlust von Eigenschaften bewirkt. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass der Kontakt mit der kochenden Salzlösung die Bindung zwischen dem Polymer und einem Verstärkungsmedium, wie z. B. Glasfasern, schwächen kann, was zu einem Verlust von mechanischen Eigenschaften, wie etwa der Zug- und Biegefestigkeit sowie der Schlagzähigkeit, führen kann. Nichtsdestotrotz ist die Auswirkung der aufgenommenen Feuchtigkeit auf Amodel-Polymere minimal.

## Feuchtigkeitsaufnahme und Glasübergangstemperatur ( $T_g$ )

Die Auswirkung der Feuchtigkeitsaufnahme auf die Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) eines Polymers ist möglicherweise viel bedeutender als die Auswirkung auf die Eigenschaften bei Raumtemperatur. Definitionsgemäß ist die  $T_g$  eines Polymers die Temperatur, ab der der kristalline Bereich der Polymermatrix nicht mehr über den amorphen Bereich dominiert. Oberhalb der  $T_g$  dominiert der amorphe Bereich und es tritt ein merklicher Verlust der mechanischen Eigenschaften auf (siehe die Ausführungen zu den mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur). Bei unverstärkten Typen ist das von großer Bedeutung, da ihre Eigenschaften auf so niedrige Werte abfallen, dass sie für eine mechanische Konstruktion im Prinzip nicht zu gebrauchen sind. Bei den verstärkten Typen sind die mechanischen Eigenschaften oberhalb der  $T_g$  in Bezug auf die Konstruktionsmöglichkeiten zwar noch brauchbar, sie lassen aber derart nach, dass dies als wesentlicher Konstruktionsfaktor unbedingt berücksichtigt werden muss.

Bei teilkristallinen Polymeren führt aufgenommene Feuchtigkeit zu einer Senkung der Glasübergangstemperatur. Das Ausmaß der Absenkung hängt von dem jeweiligen Polymer und der Menge der aufgenommenen Feuchtigkeit ab.

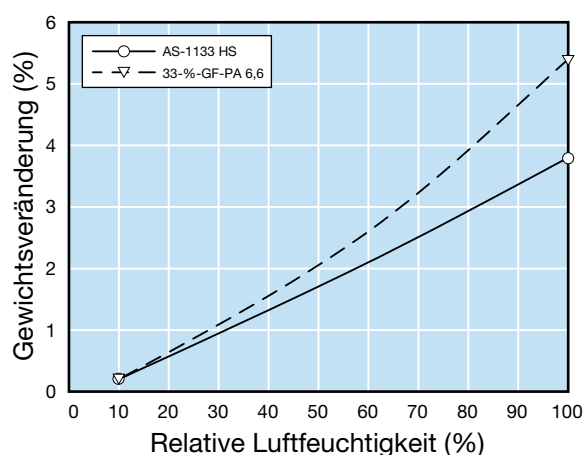
Dieses Phänomen wird zu einem erheblichen Problem, wenn Teile aus einem Polymer mit einer  $T_g$  von ungefähr bzw. unter 100 °C konstruiert werden. Beispielsweise kann ein Polymer mit einer  $T_g$  von 80 °C (spritzfrisch) nach der Aufnahme von Feuchtigkeit nur noch eine  $T_g$  von 60 °C aufweisen. Der Konstrukteur muss daher den deutlichen Verlust von Eigenschaften oberhalb von 60 °C infolge der Abnahme der  $T_g$  bei seinen Entscheidungen berücksichtigen. Bei Polymeren mit einer noch niedrigeren spritzfrischen  $T_g$  kann die  $T_g$  nach der Feuchtigkeitsaufnahme bis auf Raumtemperatur sinken. Das kann sich maßgeblich auf die Konstruktion auswirken.

Im Gegensatz dazu haben die Polymere der Amodel A-1000-Reihe eine spritzfrische  $T_g$  von 123 °C. Die Aufnahme von Feuchtigkeit bei Raumtemperatur kann diese  $T_g$  auf 84 °C senken und zu einem geringfügigen Verlust der Materialeigenschaften bei Raumtemperatur führen. Da es sich bei der Feuchtigkeitsaufnahme jedoch um ein umkehrbares Phänomen handelt (Feuchtigkeitsaufnahme ist eine physikalische, keine chemische Reaktion), trocknet das Polymer bei Temperaturen oberhalb von 100 °C, so dass die  $T_g$  zu ihrem ursprünglichen Wert von 123 °C zurückkehrt. Daher ist die Abnahme der  $T_g$  infolge einer Feuchtigkeitsaufnahme bei Amodel-Polymeren im Wesentlichen ohne Bedeutung. Die nachfolgenden Daten gelten für Anwendungen, bei denen eine Feuchtigkeitsaufnahme bei Umgebungstemperaturen erwartet und mit einem geringfügigen Verlust der Materialeigenschaften gerechnet wird. Da das Polymer die Feuchtigkeit bei Temperaturen oberhalb von 100 °C wieder abgibt und erneut seine Trockenzustand-Eigenschaften aufweist, sind Testergebnisse für eine Feuchtigkeitsaufnahme oberhalb von 100 °C für Amodel irrelevant, für Polymere mit einer  $T_g$  von ungefähr bzw. unter 100 °C jedoch sehr wichtig.

### Aufnahmemenge

Wie bereits erwähnt handelt es sich bei der Wasseraufnahme um einen umkehrbaren Prozess. Bei jeder vorgegebenen relativen Luftfeuchtigkeit und Temperatur nimmt ein Polymer Feuchtigkeit auf, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Im Gleichgewichtszustand nimmt ein Polymer Feuchtigkeit mit derselben Geschwindigkeit auf, mit der es sie abgibt, so dass das Gewicht konstant bleibt. Da das Polymer und nicht der Füllstoff bzw. die Verstärkungsadditive die Feuchtigkeit aufnimmt, ist die aufgenommene Wassermenge proportional zum Polymeranteil in jedem Typ – die stärker gefüllten Typen nehmen weniger Feuchtigkeit auf als die ungefüllten. In Abbildung 52 wird die Gewichtszunahme infolge der Feuchtigkeitsaufnahme von Amodel AS-1133 HS mit der von 33-%-glasfaserverstärktem PA 6,6 bei Raumtemperatur und vorgegebener relativer Luftfeuchtigkeit verglichen. Das PA 6,6 mit 33 % Glasfaserverstärkung nimmt deutlich mehr Feuchtigkeit auf als Amodel AS-1133 HS. Amodel-Polymere brauchen außerdem wesentlich länger als PA 6,6, um den Gleichgewichtszustand zu erreichen.

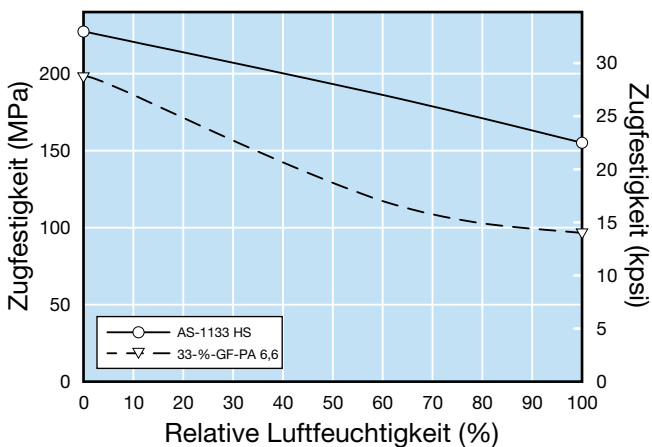
**Abbildung 52: Feuchtigkeitsaufnahme von GF-Polymeren**



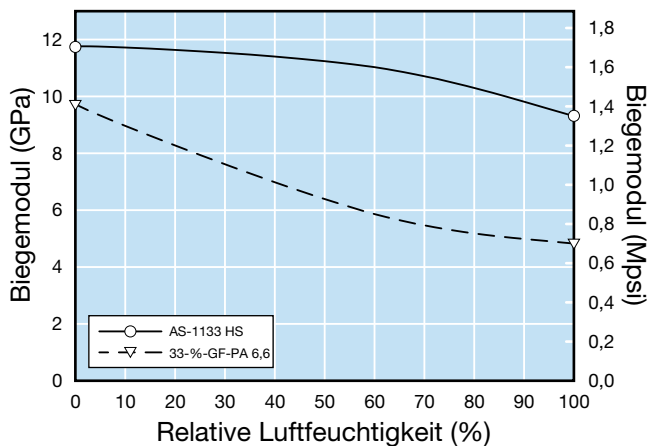
### Auswirkung von Feuchtigkeit auf Festigkeit und Steifigkeit

In Abbildung 53 wird die Zugfestigkeit von Amodel AS-1133 HS mit der von PA 6,6 mit 33 % Glasfaserverstärkung bei 23 °C und vorgegebenem Feuchtigkeitsgehalt verglichen. Die Zugfestigkeit des Amodel-Polymers ist höher als die des spritzfrischen PA und mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt nimmt der Unterschied zu.

**Abbildung 53: Auswirkung von Feuchtigkeit auf die Zugfestigkeit von GF-Polymeren**

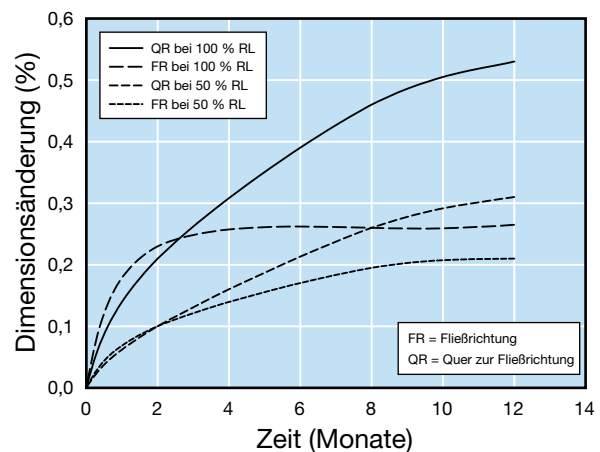


**Abbildung 54: Auswirkung von Feuchtigkeit auf den Biegemodul von GF-Polymeren**



In Abbildung 54 wird der Biegemodul von Amodel AS-1133 HS mit dem von 33%-glasfaserverstärktem PA 6,6 bei 23 °C und verschiedenen vorgegebenen Feuchtigkeitsgehalten verglichen. Der Modul des Amodel-Polymers ist im spritzfrischen Zustand höher und bleibt relativ konstant. Der Modul des PA nimmt mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt und steigender Temperatur rasch ab, da die  $T_g$  von PA 6,6 unter 100 °C liegt und mit der Aufnahme von Feuchtigkeit weiter abfällt.

**Abbildung 55: Dimensionsänderung von 33%-GF-PPA**



### Dimensionsänderung aufgrund von Feuchtigkeitsaufnahme

Um die Auswirkung der Feuchtigkeitsaufnahme auf die Teileabmessungen zu beurteilen, wurden Platten mit den Maßen 102 mm x 102 mm x 3,6 mm geformt, gemessen und Umgebungen mit Raumtemperatur (23 °C) und 50 % bzw. 100 % relativer Luftfeuchtigkeit ausgesetzt. Die Platten wurden regelmäßig entnommen und gemessen. Die Fließrichtung während des Formverfahrens wurde aufgezeichnet und es wurden Werte in Fließrichtung und quer zur Fließrichtung erfasst. Zur Berechnung der Dimensionsänderung wurde die Ausgangslänge von der Endlänge abgezogen und das Ergebnis durch die Anfangslänge dividiert. Das Ergebnis wurde mit 100 multipliziert, um die Änderung in Prozent auszudrücken.

Abbildung 55 zeigt die Ergebnisse dieses Tests für Amodel AS-1133. Selbst bei 100 % relativer Luftfeuchtigkeit ändern sich die Abmessungen noch für eine geraume Zeit. Die Diagramme zeigen, dass die Änderungsgeschwindigkeit nach einem Jahr stark abgenommen hat, sich die Abmessungen aber immer noch ändern. Die Abmessungen in Fließrichtung ändern sich weniger als die quer zur Fließrichtung – wahrscheinlich aufgrund der Ausrichtung der Verstärkungsfasern in Fließrichtung. Das Ausmaß der Dimensionsänderung ist relativ gering (weniger als 0,6 %), könnte aber bei Anwendungen mit extrem engen Formtoleranzen und hohen Anforderungen an die Stabilität von Bedeutung sein.

**Abbildung 56: Dimensionsänderung von PPA mit 40 % Mineralverstärkung**

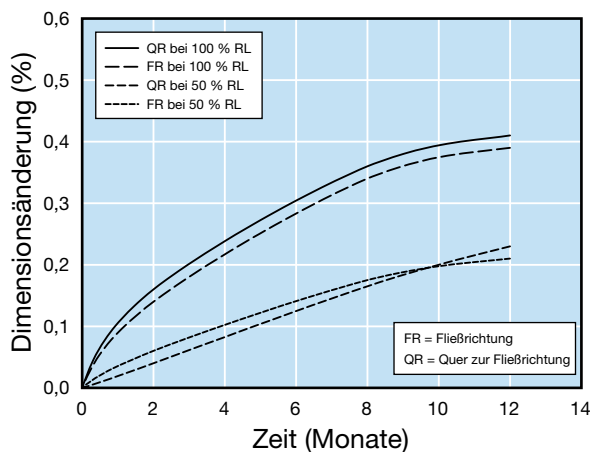
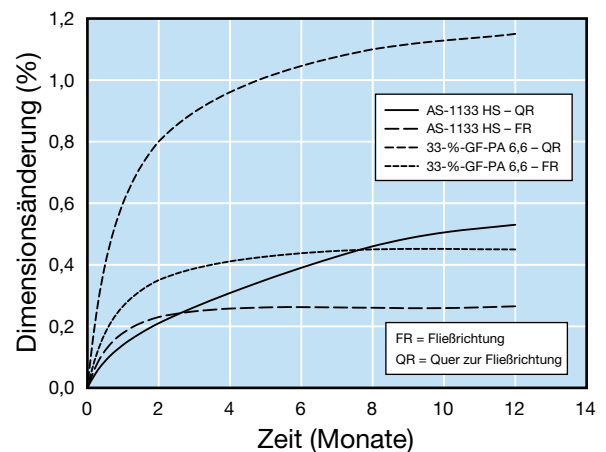


Abbildung 56 zeigt die gleichen Ergebnisse für Amodel A-1340 PPA, einem 40-%-mineralverstärkten Typ. Die Dimensionsänderungen sind nicht nur geringer, auch der Unterschied zwischen Fließrichtung und quer zur Fließrichtung ist beinahe vernachlässigbar.

#### Dimensionsänderung im Vergleich zu PA 6,6

In Abbildung 57 wird die Dimensionsänderung infolge der Feuchtigkeitsaufnahme von Amodel AS-1133 HS mit der von 33-%-glasfaserverstärktem PA 6,6 bei 100 % RL verglichen. Um einen gültigen Vergleich sicherzustellen, wurden beide Werkstoffe unter Bedingungen geformt, die für maximale Kristallinität sorgen. Beim Amodel-Polymer wurde eine Werkzeugtemperatur von 135 °C verwendet. Beim PA 6,6 betrug die Werkzeugtemperatur 93 °C. Platten mit einer Dicke von 3,2 mm wurden 100 % RL bei Raumtemperatur ausgesetzt.

**Abbildung 57: Dimensionsvergleich von GF-PA 6,6 und GF-PPA bei 100 % RL**



Das Amodel-Polymer nimmt Feuchtigkeit viel langsamer auf als PA 6,6, da der Diffusionskoeffizient von Wasser in PA 6,6 bei Raumtemperatur ungefähr das Fünffache dessen von Amodel-Polymeren beträgt. Daher erreicht PA 6,6 bei diesen Platten in etwa vier Monaten einen Gleichgewichtszustand, während Amodel AS-1133 HS dazu über zwei Jahre benötigt.



# Thermische Eigenschaften

Im Prinzip zeigen die thermischen Eigenschaften auf, wie ein Material auf Temperaturänderungen, sowohl kurzzeitig als auch langfristig, reagiert. Die thermischen Eigenschaften umfassen u. a. die Auswirkungen der Temperatur auf:

- Festigkeit und Steifigkeit
- Abmessungen
- Chemische Veränderungen des Polymers infolge von thermischer oder oxidativer Zersetzung
- Erweichen, Schmelzen oder Verziehen
- Morphologie

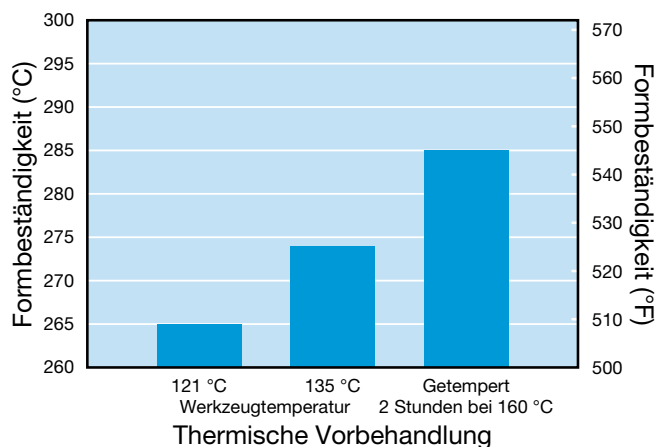
Die Materialeigenschaften im geschmolzenen Zustand werden in der Literatur zur Verarbeitung von Amodel-PPA behandelt. Das Materialverhalten beim Verbrennen wird im Abschnitt „Brandeigenschaften“ erläutert.

## Wärmeformbeständigkeit (HDT)

Die in der Kunststoffindustrie am häufigsten verwendeten Prüfmethode zur Messung der kurzzeitigen thermischen Eigenschaften sind ASTM D648 *Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load* (Standardprüfmethode für die Formbeständigkeit von Kunststoffen unter Biegebelastung) und ISO 75 *Plastics – Determination of Temperature of Deflection Under Load* (Kunststoffe – Bestimmung der Wärmeformbeständigkeitstemperatur). Die Ergebnisse werden allgemein als „Wärmeformbeständigkeit“ (HDT) oder „Formbeständigkeit unter Belastung“ (DTUL) bezeichnet. Beide Prüfmethode sind insofern ähnlich, als dass der Probekörper an zwei Auflagepunkten gestützt und in der Mitte belastet wird. Die Temperatur wird mit konstanter Geschwindigkeit erhöht, bis sich der Probekörper um einen vorgegebenen Betrag durchbiegt (gemäß der Anzeige einer Messuhr).

Obwohl sich die Prüfmethode in ihren Details wie Probekörpergeometrie, Endpunkt der Biegung, Probekörperorientierung und Abstand zwischen den Auflagepunkten unterscheiden, wird der Probekörper bei beiden Methoden mit 1,8 MPa und 0,45 MPa belastet. Beim Vergleichen von Daten aus mehreren Quellen muss darauf geachtet werden, dass sie mit derselben Prüfmethode ermittelt wurden. In den Tabellen mit typischen Eigenschaften ab Seite 6 sind Werte aufgeführt, die mit beiden Methoden ermittelt wurden. Eine genauere Betrachtung der Daten ergibt, dass sich bei einigen Typen die Werte erheblich unterscheiden. Bestimmte Testparameter können sich maßgeblich auf die in diesem Test ermittelten Ergebnisse auswirken. Konstrukteure müssen sich vergewissern, dass Daten, die aus mehreren Quellen stammen, wirklich vergleichbar sind. Der am häufigsten begangene und schwerwiegendste Fehler ist das Vergleichen von Ergebnissen eines Tests mit 1,8 MPa mit denen eines Tests mit 0,45 MPa. Sofern nicht anders angegeben, wurden alle Amodel-Polymere bei 1,8 MPa

**Abbildung 58: Auswirkungen von Werkzeugtemperatur und Temperung auf die HDT von Amodel AS-1133 HS**

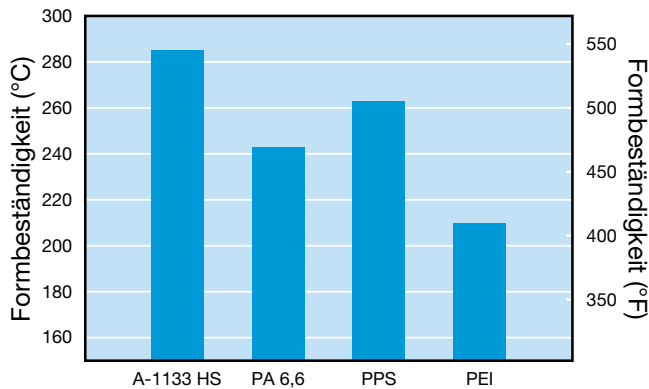


getestet. Die anderen zu beachtenden Testparameter sind die Dicke des Probekörpers und seine thermische Vorbehandlung. Der Test kann unmittelbar nach dem Spritzgießvorgang oder nach einer mehrstündigen Wärmebehandlung bzw. Temperung bei einer Temperatur etwas oberhalb der Glasübergangstemperatur bzw. bei ca. 160 °C für Amodel-PPA durchgeführt werden.

In der Regel reduziert die Temperung die Schwankungen der Wärmeformbeständigkeitsmessungen und erhöht deren Wert zudem geringfügig. Abbildung 58 zeigt die Auswirkungen der Werkzeugtemperatur und der Temperung auf die Wärmeformbeständigkeit bei 1,8 MPa für Amodel AS-1133 HS. Wie man sieht, können die Auswirkungen der Werkzeugtemperatur und/oder der Temperung eine Änderung der Wärmeformbeständigkeit von bis zu 17 °C bewirken. Die Wärmeformbeständigkeitswerte in diesem Handbuch wurden mithilfe von Probekörpern ermittelt, die bei 160 °C zwei Stunden lang getempert wurden.

Die Wärmeformbeständigkeit ist ein temperaturabhängiger Modulmesswert. Eine klassische Spannungs-Dehnungs-Analyse ergibt, dass der ASTM D648-Test eigentlich die Temperatur misst, bei der der Biegemodul einen Wert von 240 MPa (bei einer Spannung von 0,45 MPa) bzw. 965 MPa (bei einer Spannung von 1,8 MPa) aufweist. Da die Prüfmethode vorschreibt, dass die Messuhr nach fünf Minuten auf null zurückgestellt werden muss, wird die in den ersten fünf Minuten auftretende Kriechdehnung effektiv von der Enddehnung abgezogen, was den tatsächlichen Modul am Endpunkt des Tests senkt. Der Anfangsmodul kann mit der Kriechdehnung in Bezug gesetzt werden.

**Abbildung 59: HDT von Polymeren mit 30–33 % GF**



Zusammenfassend kann man sagen, dass die Wärmeformbeständigkeit keine thermische Eigenschaft misst, sondern lediglich einen Punkt auf der Kennlinie des Moduls in Abhängigkeit von der Temperatur liefert.

Im Prinzip dient die HDT nur als allgemeiner Indikator für kurzzeitige Temperatureigenschaften. Sie ist beim Vergleichen ähnlicher Werkstoffe hilfreich, kann jedoch zu Fehlschlüssen verleiten, wenn beispielsweise ein amorpher Werkstoff mit einem teilkristallinen Werkstoff verglichen wird. Sie liefert keine Daten zur thermischen Langzeitstabilität. Die Eignung eines Werkstoffes wird durch die tatsächlichen Belastungen und Leistungsanforderungen bestimmt. Viele teilkristalline Polymere können in Anwendungen mit Temperaturen, die über ihren Wärmeformbeständigkeitswerten liegen, eingesetzt werden.

### Wärmeformbeständigkeitswerte von Amodel-Polymeren

Die Wärmeformbeständigkeitswerte gemäß ASTM D648 und ISO 75Af für 19 repräsentative Amodel-PPA-Typen sind in den Tabellen ab Seite 7 aufgeführt.

In Abbildung 59 wird die Wärmeformbeständigkeit bei 1,8 MPa von Amodel AS-1133 HS mit einem 33%-glasfaserverstärkten PA 6,6, einem 30%-glasfaserverstärkten Polyphenylensulfid und einem 30%-glasfaserverstärkten Polyetherimid verglichen. Die HDT von Amodel ist 75 °C höher als die von PEI, 42 °C höher als die von PA 6,6 und 22 °C höher als die von PPS.

### Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient (CLTE)

Die Abmessungen der meisten Materialien nehmen mit steigender Temperatur zu. Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient ( $\alpha$ ) ist das Verhältnis der Längenänderung zur Temperaturänderung.

Bei einem bekannten Koeffizient kann die Längenänderung eines gleichförmigen geraden Stabs, der auf eine Temperatur  $T_i$  erwärmt wird, folgendermaßen berechnet werden:

$$\Delta L = \alpha L (T_F - T_O)$$

wobei

$\Delta L$  = Längenänderung

$L$  = Anfangslänge

$\alpha$  = linearer Wärmeausdehnungskoeffizient

$T_F$  = Endtemperatur

$T_O$  = Anfangstemperatur

Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient ( $\alpha$ ) einiger Amodel-Typen und einiger gängiger Metalle (gemessen nach Prüfmethode ASTM E831) ist in Tabelle 19 aufgeführt. Diese Methode liefert einen Durchschnittswert des Ausdehnungskoeffizienten in einem Temperaturbereich.

Das Wärmeausdehnungsverhalten von Metallen ist im betreffenden Temperaturbereich gleichmäßig. Wie Tabelle 19 zeigt, sind die Wärmeausdehnungskoeffizienten der Polymere abhängig von dem für die Messung verwendeten Temperaturbereich. Das heißt, die Polymere dehnen sich oberhalb der Glasübergangstemperatur etwas mehr aus als darunter und ihr Verhalten in der Umgebung der  $T_g$  ist ebenfalls zu einem gewissen Grad nichtlinear. Diese Schwankungen sind jedoch in großen Temperaturbereichen normalerweise unerheblich und die in der Tabelle aufgeführten Werte können für zuverlässige Vorhersagen der Dimensionsstabilität herangezogen werden. Außerdem führt die Zugabe von Glasfasern und anderen Verstärkungsadditiven dazu, dass die Wärmeausdehnung richtungsbehaftet wird. Die Wärmeausdehnungskoeffizienten in Fließrichtung sind allgemein niedriger als die quer zur Fließrichtung, da zum einen Fasern dazu neigen, sich in Fließrichtung auszurichten, und zum anderen Glas einen niedrigeren Wärmeausdehnungskoeffizienten als die Polymere hat.

Anhand der in Tabelle 19 aufgeführten Werte kann die Größenordnung der thermischen Spannungen in Formteilen aus Amodel, die durch Wärmeausdehnung entstehen, abgeschätzt werden.

**Tabelle 19: Lineare Wärmeausdehnungskoeffizienten**

Werte sind in  $10^{-6}$  L/L pro Grad angegeben, wobei L die Länge ist

Temperatur	0–50 °C				50–100 °C				100–150 °C				150–200 °C			
Richtung	FR <sup>(1)</sup>		QR <sup>(2)</sup>		FR		QR		FR		QR		FR*		QR	
Einheit	/°C	/°F	/°C	/°F	/°C	/°F	/°C	/°F	/°C	/°F	/°C	/°F	/°C	/°F	/°C	/°F
<b>Glasfaserverstärkte Typen</b>																
A-1133 HS	24	13	50	28	24	13	60	33	27	15	99	55	27	15	130	72
A-1145 HS	22	12	49	27	21	12	58	32	27	15	88	49	15	8	122	68
A-6135 HN	23	13	59	33	21	12	63	35	16	9	96	53	15	8	109	61
AS-4133 HS	20	11	64	36	20	11	87	48	20	11	114	63	9	5	126	70
<b>Schlagzähmodifizierte Typen</b>																
AT-1002 HS	70	39	84	47	85	47	101	56	145	81	126	70	112	62	153	85
ET-1000 HS	68	38	80	44	85	47	81	45	147	82	97	54	142	79	113	63
ET-1001 L	71	39	69	38	94	52	80	44	167	93	88	49	170	94	118	66
AT-5001	93	52	106	59	136	76	144	80	184	102	184	102	153	85	142	79
<b>Schlagzähmodifizierte, glasfaserverstärkte Typen</b>																
AT-1116 HS	20	11	72	40	23	13	77	43	16	9	116	64	16	9	133	74
AT-6115 HS	23	13	83	46	21	12	97	54	34	19	116	64	26	14	121	67
<b>Flammhemmende Typen</b>																
AFA-1633 V0 Z	18	10	56	31	16	9	72	40	11	6	93	52	3	2	120	67
<b>Mineral- und mineral-/glasfaserverstärkte Typen</b>																
A-1240 L	26	14	68	38	19	11	91	51	18	10	117	65	15	8	121	67
A-1340 HS	34	19	50	28	42	23	60	33	51	28	103	57	19	11	103	57
A-1565 HS	20	11	34	19	20	11	39	22	20	11	72	40	14	8	89	49
AS-1566 HS	17	9	36	20	17	9	44	24	17	9	59	33	16	9	85	47
AP-9240 NL	54	30	48	27	87	48	61	34	110	61	81	45	87	48	110	61
<b>Gängige Metalle</b>																
Zinklegierung	27	15	27	15	27	15	27	15	27	15	27	15	27	15	27	15
Aluminiumlegierung A-360	21	12	21	12	21	12	21	12	21	12	21	12	23	13	23	13
Edelstahl	17	9	17	9	17	9	17	9	17	9	17	9	18	10	18	10
Kohlenstoffstahl	11	6	11	6	11	6	11	6	11	6	11	6	12	7	12	7

<sup>(1)</sup> FR = Fließrichtung

<sup>(2)</sup> QR = Querrichtung oder senkrecht zur Fließrichtung



**Tabelle 20: Wärmeleitfähigkeit von Amodel-PPA-Polymeren**

Typen	Additiv	Gehalt (%)	Durchschnittstemperatur					
			40 °C		100 °C		150 °C	
			W/ mK	Btu in/ h ft² °F	W/ mK	Btu in/ h ft² °F	W/ mK	Btu in/ h ft² °F
A-1115 HS	Glasfaser	15	0,289	2,00	0,307	2,13	0,324	2,25
AS-1133 HS	Glasfaser	33	0,341	2,37	0,360	2,50	0,376	2,61
AS-1145 HS	Glasfaser	45	0,372	2,58	0,393	2,73	0,409	2,84
A-1240 L	Mineralstoff	40	0,377	2,62	0,388	2,69	0,399	2,77
A-1340 HS	Mineralstoff/ Glasfaser	25/15	0,422	2,93	0,430	2,98	0,436	3,02

## Wärmeleitfähigkeit

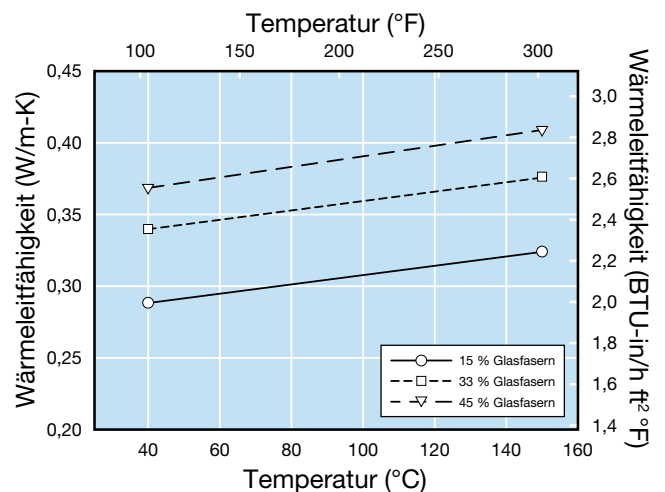
Die Wärmeleitfähigkeit ist die Geschwindigkeit, mit der Wärmeenergie durch ein Material fließt. Diese Eigenschaft ist bei Anwendungen von Bedeutung, bei denen das Polymer zur Wärmedämmung verwendet wird oder bei denen Wärmeabfuhr ein Problem ist.

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte gemäß ASTM F433. Bei dem Test wird ein Probekörper zwischen Platten, deren Temperatur jeweils unterschiedlich eingestellt werden kann, platziert und der Wärmefluss durch den Probekörper wird überwacht. Die Wärmeleitfähigkeit wurde bei drei Durchschnittstemperaturen – 40 °C, 100 °C und 150 °C – gemessen, indem die heiße Platte auf etwa 7 °C über der Durchschnittstemperatur und die kalte Platte auf etwa 7 °C unter der Durchschnittstemperatur eingestellt wurde.

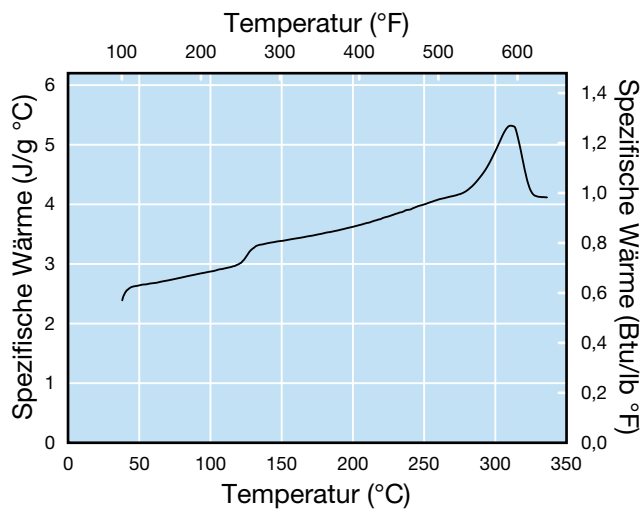
Die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Amodel-Typen wurde bei jeder der angegebenen Temperaturen gemessen und die Ergebnisse sind in Tabelle 20 aufgeführt. Höhere Wärmeleitfähigkeitswerte bedeuten einen größeren Wärmefluss und niedrigere Werte bedeuten bessere Wärmedämmeigenschaften.

Abbildung 60 zeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit mit Glasfasergehalt und Temperatur zunimmt.

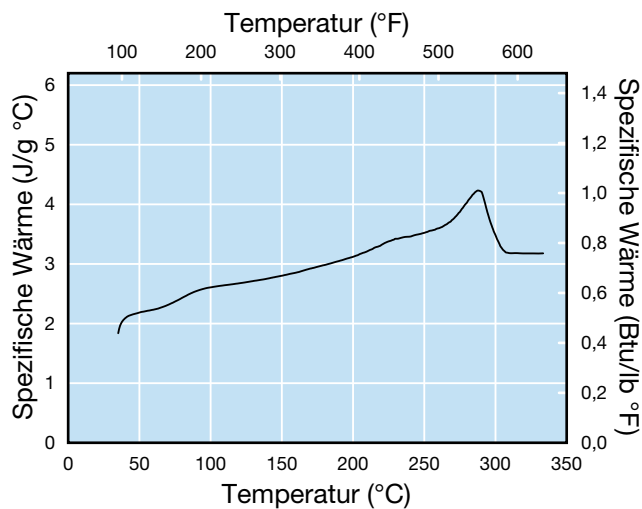
**Abbildung 60: Wärmeleitfähigkeit von glasfaserverstärktem Amodel-PPA**



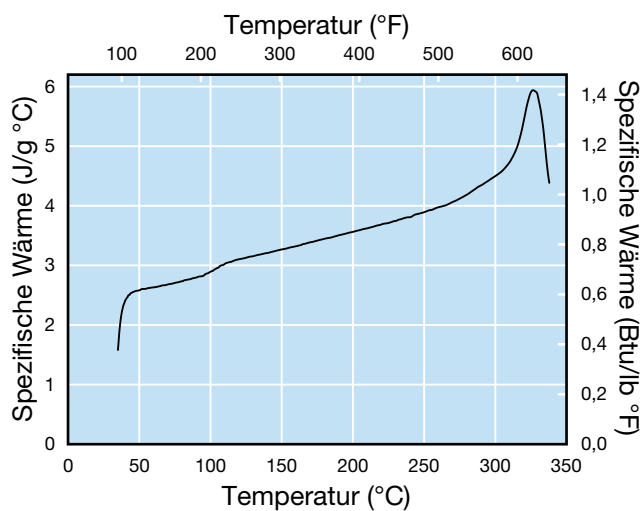
**Abbildung 61: Amodel A-1000-PPA – spezifische Wärme in Abhängigkeit von der Temperatur**



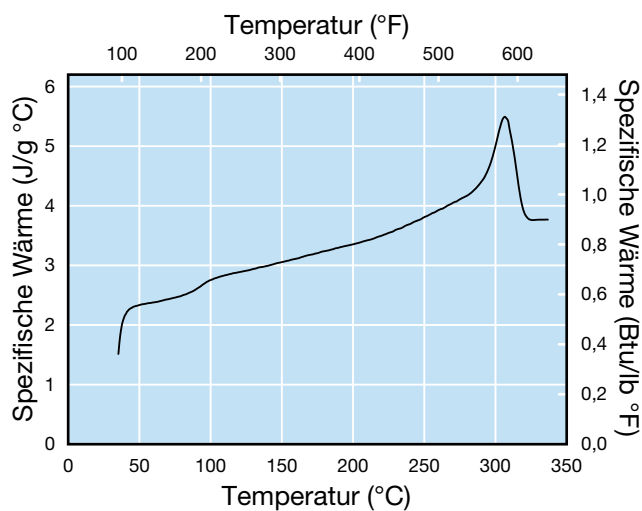
**Abbildung 63: Amodel A-5000 – spezifische Wärme in Abhängigkeit von der Temperatur**



**Abbildung 62: Amodel A-4000 – spezifische Wärme in Abhängigkeit von der Temperatur**



**Abbildung 64: Amodel A-6000 – spezifische Wärme in Abhängigkeit von der Temperatur**



## Spezifische Wärme

Die spezifische Wärme ist als die Wärmemenge definiert, die erforderlich ist, um die Temperatur einer Masseneinheit um ein Grad zu erhöhen. Die Abbildungen 61 bis 64 zeigen die spezifische Wärme der Amodel-Grundpolymere in Abhängigkeit von der Temperatur. Es ist deutlich zu sehen, dass sich die spezifische Wärme am Schmelzpunkt erheblich ändert. Dieses Verhalten ist typisch für teilkristalline Thermoplaste.

Anhand dieser Angaben können Verfahrensingenieure die für die Verarbeitung von Amodel-Polymeren auf Anlagen wie Extrudern oder Spritzgießmaschinen erforderliche Wärmezufuhr berechnen.

## Thermische Stabilität

Der allgemeine Begriff „thermische Stabilität“ beschreibt die Fähigkeit eines Materials, dem Verlust von Eigenschaften infolge von Wärme zu widerstehen. Zur Bewertung dieser Tendenz werden verschiedene Prüfmethoden angewandt. Im folgenden Abschnitt werden einige dieser Methoden erläutert, einschließlich der thermogravimetrischen Analyse und der Langzeit-Wärmealterung.

### Thermogravimetrische Analyse (TGA)

Bei der thermogravimetrischen Analyse wird die Temperatur einer kleinen Probe des Testmaterials mit konstanter Geschwindigkeit erhitzt und dabei deren Gewicht überwacht. Der Test findet in einer kontrollierten Atmosphäre statt und kann so in Luft oder in einer inerten Atmosphäre, wie z. B. Stickstoff, durchgeführt werden. Abbildung 65 zeigt den Gewichtsverlust von Amodel A-1000 in Abhängigkeit von der Temperatur in Luft bei einer Erwärmungsgeschwindigkeit von 10 °C/min. Das Diagramm zeigt, dass Amodel-PPA-Polymere über die empfohlene Obergrenze der Verarbeitungstemperatur von 350 °C hinaus thermisch stabil sind.

### Wärmealterung

Nahezu alle Polymere weisen nach der Langzeiteinwirkung hoher Temperaturen einen gewissen Verlust an Materialeigenschaften auf. Auch wenn einige Polymere stabiler sind als andere, ist der Verlust der Eigenschaften in der Regel abhängig von der Einwirkungszeit und der Temperatur. Da der Verlust der Eigenschaften sowohl durch Oxidation als auch durch thermischen Abbau verursacht wird, wird häufig der Begriff „thermooxidative Stabilität“ verwendet.

Die thermooxidative Stabilität beschränkt die zulässige Langzeitemperaturbelastung einiger Polymere. Um diese Langzeitauswirkungen auf die Eigenschaften von Amodel-Polyphthalamid zu beurteilen, wurden geformte Probekörper aus Amodel-Kunststoffen bei verschiedenen erhöhten Temperaturen in Umluftöfen gelagert. Die Probekörper wurden in regelmäßigen Abständen aus dem Ofen genommen und bei Raumtemperatur auf Zugfestigkeit und Schlagzähigkeit geprüft.

Normalerweise werden diese Alterungsprüfungen so lange ausgeführt, bis die überwachte Eigenschaft auf die Hälfte ihres Anfangswerts abgefallen ist. Die Alterungsprüfungen werden bei mehreren Alterungstemperaturen durchgeführt. Anschließend wird ein „Arrhenius-Diagramm“ erstellt. Im „Arrhenius-Diagramm“ wird die Wärmealterungszeit, die benötigt wird, um eine Eigenschaft auf die Hälfte ihres Anfangswerts zu reduzieren (manchmal Halbwertszeit genannt), über den Kehrwert der Alterungstemperatur in Grad Kelvin aufgetragen. Der Vorteil dieser Art der Datenanalyse besteht darin, dass die Kennlinie im Wesentlichen eine Gerade und daher leicht zu extrapolieren ist.

Abbildung 65: Thermogravimetrische Analyse von A-1000 in Luft

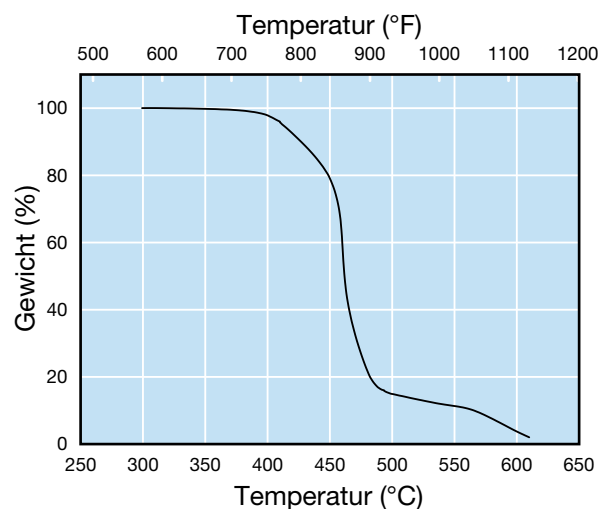


Abbildung 66: Wärmealterungsvergleich – Zugfestigkeit

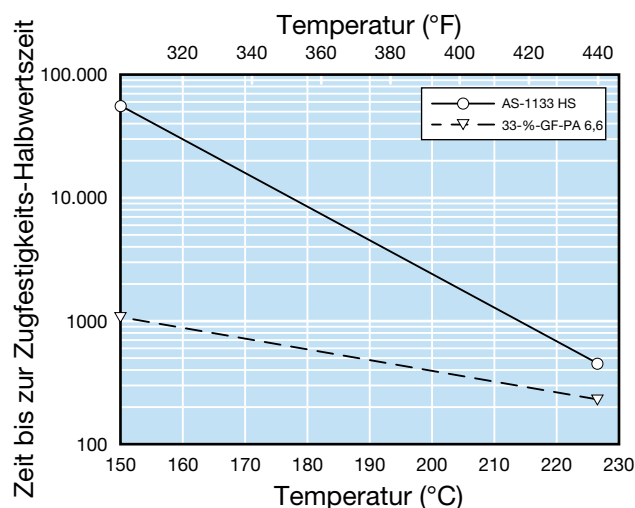


Abbildung 66 zeigt das Diagramm der Zugfestigkeits-Halbwertszeiten von Amodel AS-1133 HS und GF-PA 6,6 in Abhängigkeit von der Alterungstemperatur. Die Zugfestigkeit von Amodel-PPA bleibt länger erhalten als die von PA 6,6.

**Abbildung 67: Wärmealterungsvergleich – Izod-Schlagzähigkeit**

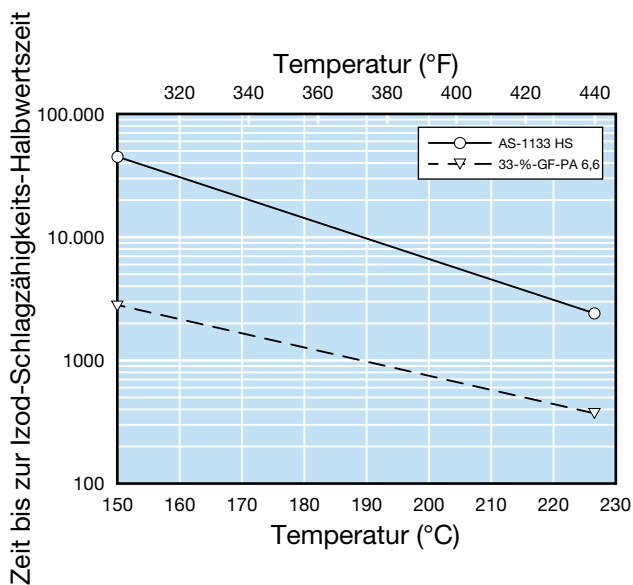


Abbildung 67 zeigt die Wärmealterungskennlinien für die Halbwertszeit der Izod-Kerbschlagzähigkeit von Amodel AS-1133 HS und GF-PA 6,6 in Abhängigkeit von der Alterungstemperatur. Amodel-PPA benötigt auch längere Alterungszeiten als PA 6,6, bevor ein Verlust der Schlagzähigkeit auftritt.

Wärmealterungsprüfungen wie diese werden für den Vergleich von Kunststoffen sowie zur Einschätzung ihrer Lebensdauer herangezogen. Die Lebensdauer eines Werkstoffes bei einer bestimmten Endanwendungstemperatur hängt größtenteils von den Anforderungen der Anwendung ab und sollte anhand seiner Wärmealterungsdaten und echter oder simulierter Anwendungstests beurteilt werden.

### Relativer Temperaturindex (UL)

Eine Hauptaufgabe der Underwriters Laboratories Inc. besteht darin, Hilfestellung bei der Einschätzung der mit elektrischen Geräten zusammenhängenden Brandgefahr zu leisten. Da Isolierstoffe sich mit der Zeit zersetzen können, wurde eine Prüfmethode zur Beurteilung dieser Tendenz benötigt, um Konstrukteuren und Anwendern von Elektrogeräten entsprechende Richtwerte zu liefern. Die Underwriters Laboratories (UL) haben für diesen Zweck eine Prüfmethode und ein Klassifizierungssystem entwickelt. Bei der Prüfmethode handelt es sich um den UL-Standard 746B „Polymere – Beurteilung von Langzeiteigenschaften“. Eine ähnliche Prüfmethode ist ASTM D3045 „Standard Practice for Heat Aging of Plastics Without Load“.

Anhand der Ergebnisse der im vorstehenden Abschnitt beschriebenen Alterungsprüfungen weisen die Underwriters Laboratories Isolierstoffen einen sogenannten „relativen Temperaturindex“ zu. Da nicht alle Materialeigenschaften gleichzeitig nachlassen, kann ein Werkstoff verschiedene

relative Temperaturindizes für elektrische Eigenschaften, für mechanische Eigenschaften ohne Schlagbelastung und für mechanische Eigenschaften mit Schlagbelastung aufweisen.

Der relative Temperaturindex (oder RTI) wird durch eine statistische Auswertung der Wärmealterungsdaten für die zu beurteilenden Eigenschaften bestimmt. Der RTI gibt die Alterungstemperatur an, der ein Material 100.000 Stunden lang ausgesetzt werden kann, und bei der es trotzdem mindestens 50 % des Anfangswerts der gemessenen Eigenschaft(en) beibehält.

Da die Zersetzungsrate für dünnere Probekörper höher ist, gibt UL RTI-Klassifizierungen für jede geprüfte Dicke an.

Für eine RTI-Klassifizierung nach UL wird ein Langzeit-Wärmealterungsprogramm durchgeführt. Gruppen von aus dem zu prüfenden Material geformten Probekörpern werden in Öfen mit vorgegebenen Temperaturen gelegt. Die Probekörper werden in regelmäßigen Zeitabständen herausgenommen und geprüft. Die Ergebnisse für jede Alterungstemperatur werden in einem Zeit/Eigenschaften-Diagramm aufgetragen, bis die gemessene Eigenschaft auf mindestens 50 % ihres Ausgangswerts (oder darunter) abfällt. Diese Kombination aus Zeit und Alterungstemperatur kann als „Halbwertszeit“ für diese Eigenschaft, für dieses Material und für diese Dicke bezeichnet werden.

Die Halbwertszeiten (Zeit bis 50 % oder darunter) für eine bestimmte Eigenschaft, die experimentell bei vier Alterungstemperaturen ermittelt wurden, werden über den Kehrwert der absoluten Alterungstemperatur aufgetragen. Diese Punkte sollten eine Gerade ergeben, die extrapoliert werden kann, um die Material-Halbwertszeit für die jeweilige Eigenschaft bei anderen Temperaturen zu bestimmen. Dieses Diagramm heißt „Arrhenius-Diagramm“.

Zur Schätzung des RTI für das Material wird eine Ausgleichsgerade durch die vier Halbwertszeitpunkte für die Zugfestigkeit gezogen und bis auf 100.000 Stunden verlängert. Die Temperatur, bei der diese Gerade die 100.000-Stunden-Linie schneidet, ist ein Schätzwert des RTI für das jeweilige Material. Falls nur drei Halbwertszeitpunkte vorliegen, z. B. wenn die Daten für die vierte Temperatur noch ermittelt werden, kann ein vorläufiger RTI zuerkannt werden. Der von UL zugewiesene RTI ist möglicherweise etwas niedriger, da experimentelle Schwankungen durch statistische Methoden kompensiert werden.

Die Prüfung von Amodel-Polymeren zur Ermittlung von relativen Temperaturindizes nach UL ist andauernd. Die UL-Klassifizierungen einiger Amodel-Polymere zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Handbuchs sind in Tabelle 21 aufgeführt. Da diese Tests weiter andauern, sind die neuesten RTIs der Website der Underwriters Laboratories (<http://data.ul.com>) zu entnehmen.

**Tabelle 21: Relative Temperaturindizes von Amodel-PPA-Typen**

Typ	Farbe	Dicke (mm)	Elektrisch	Relativer Temperaturindex (RTI) (°C)	
				Mechanisch	
				Mit Schlagbelastung	Ohne Schlagbelastung
AFA-4133 V0 Z	ALLE	0,75	130	130	130
		1,5	130	130	130
		3,0	130	130	130
AFA-6133 V0 Z	ALLE	0,75	130	130	130
		1,5	130	130	130
		3,0	130	130	130
AFA-6145 V0 Z	ALLE	0,75	140	—	130
		1,5	140	—	130
		3,0	140	140	140

## Brandeigenschaften

In diesem Abschnitt werden die Flammen- und Entzündungsbeständigkeit von Amodel-Polymeren sowie die Rauchdichteigenschaften des Materials nach einer Entzündung beschrieben. Im Folgenden werden die Ergebnisse des Glühdrahttests, die Klassifizierungen nach UL 94 und die Ergebnisse des ASTM-Rauchdichtetests aufgeführt.

### Glühdrahttest

Die Fähigkeit, eine Zündung in Kunststoffen auszulösen und aufrechtzuerhalten, kann mit dem standardisierten Glühdrahttest bestimmt werden. Dieser Test simuliert Bedingungen, die vorhanden sind, wenn ein freigelegter, stromführender Leiter mit einem Isolierstoff während eines fehlerhaften Vorgangs oder Überladevorgangs in Kontakt kommt. Die folgende Prüfmethode ist in IEC 695-2-1/3 beschrieben.

Die Glühdrahttest-Apparatur besteht aus einer Schleife aus dickem Chrom-Nickel-Widerstandsdraht, einem Thermoelement und einer Probehalterung.

Während des Tests wird ein elektrischer Strom durch die Chrom-Nickel-Schleife geleitet, um eine vorbestimmte Temperatur zu erzeugen. Die Probe wird dann 30 Sekunden lang mit dem Draht in Kontakt gebracht. Der Test gilt als bestanden, wenn die Probe nach dem Zurückziehen keine Flamme bzw. kein Glühen zeigt oder, falls dies der Fall ist, nach 30 Sekunden von selbst erlischt.

Der Test kann bei einer oder mehreren empfohlenen Temperaturen sowie für jede benötigte Wanddicke angewandt werden. Die empfohlenen Temperaturen sind 550 °C, 650 °C, 750 °C, 850 °C und 960 °C. Die Dicke wird normalerweise durch die Konstruktion bzw. durch die Anforderungen der Vorrichtung bestimmt. Die Entzündungsbeständigkeit ist bei hoher Glühdrahttemperatur und dünnen Wanddicken am geringsten.

Die UL-Definitionen für die Standardparameter sind in Tabelle 22 enthalten.

Amodel-Polymere haben Glühdrahttests gemäß Tabelle 23 bestanden.

**Tabelle 22: UL-Definitionen von GWIT und GWFT**

### IEC-Glühdrahtentzündungstemperatur (GWIT)

Dieser Wert wird gemäß IEC 695-2-1/3 als die Temperatur (in °C) ausgedrückt, die 25 °C höher ist als die maximale Temperatur der Glühdrahtspitze, die bei drei aufeinanderfolgenden Tests keine Entzündung bewirkt.

### IEC-Glühdrahtflammentemperatur (GWFT)

Dieser Wert wird gemäß IEC 695-2-1/2 als die höchste Temperatur (in °C) ausgedrückt, bei der in drei aufeinanderfolgenden Tests eine flammende Verbrennung oder ein Glühen des Probekörpers innerhalb von 30 Sekunden nach dem Zurückziehen des Glühdrahts ohne Entzündung des Indikators durch brennende Tropfen oder Partikel erlischt.

**Tabelle 23: Ergebnisse der Glühdrahttests**

Typ <sup>(1)</sup>	GWIT		GWFT	
	°C	°F	°C	°F
A(AS)-1133 HS	725	1337	725	1337
AT-6115 HS	750	1382	800	1472
AT-6130	725	1337	750	1382
AS-1566 HS	775	1427	800	1472
AS-4133 HS	750	1382	750	1382
AFA-6133 V0 Z	960	1760	960	1760

<sup>(1)</sup> Alle Probekörper hatten eine Dicke von 0,8 mm.

**Tabelle 24: Rauchdichte**

Typ	D <sub>s</sub> bei 4 min	D <sub>m</sub>	D <sub>m</sub> kor.
<b>Flammversuch</b>			
AS-1133 HS	565	510	469
<b>Schwelversuch</b>			
AS-1133 HS	3	162	162

### Rauchdichtetest (NBS)

Brennt ein Werkstoff, wird Rauch erzeugt. Die Menge und Dichte des erzeugten Rauchs sind für viele Anwendungen von Bedeutung. Die Prüfmethode ASTM E662 „Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials“ ist ein Standardverfahren zur Bewertung der relativen Rauchdichte. Dieser Test wurde ursprünglich vom National Bureau of Standards (NBS) in den USA entwickelt und wird daher oft auch NBS-Rauchdichtetest genannt. Die Daten in Tabelle 24 wurden im Schwel- als auch im Flammversuch ermittelt. Ein 6-Kanalbrenner wurde verwendet, um eine Reihe von kleinen Flammen unter dem unteren Teil des Probekörpers zu erzeugen. Ein vertikal ausgerichtetes Lichtmesssystem wurde verwendet, um die Lichtdurchlässigkeit bei Rauchzunahme zu messen. Die spezifische optische Dichte (D<sub>s</sub>) wird anhand der Lichtdurchlässigkeit berechnet. Die maximale optische Dichte wird mit D<sub>m</sub> bezeichnet.

### Vertikale Entflammbarkeit nach UL 94

Die Entflammbarkeitsnorm UL 94, die von den Underwriters Laboratories entwickelt wurde, ist ein System, mit dem Kunststoffe nach ihrer Flammwidrigkeit klassifiziert werden können. Die Einstufung eines Kunststoffes hängt von seiner Reaktion gegenüber Hitze und Flammen unter kontrollierten Laborbedingungen ab und dient als vorläufiger Indikator seiner Flammwidrigkeit für den Einsatz in einer bestimmten Anwendung. Das tatsächliche Verhalten eines Thermoplasten gegenüber Hitze und Flammen hängt von anderen Faktoren, wie Größe, Form und Anwendung des aus dem Material hergestellten Produkts, ab. Zusätzlich bei der tatsächlichen Anwendung auftretende Parameter wie Entzündungsneigung, Brandgeschwindigkeit, Flammenausbreitung, Einfluss eines Brennstoffs, Intensität der Verbrennung und Verbrennungsprodukte beeinflussen die Verbrennungsreaktion.

Die UL 94-Norm umfasst drei Hauptprüfmethode: den Horizontalen Flammtest, den Vertikalen 50-W-Flammtest (20 mm) und den Vertikalen 500-W-Flammtest (125 mm).

### Horizontaler Flammtest

Für eine Einstufung nach 94HB sind spritzgegossene Probekörper von 125 mm Länge, 13 mm Breite und der minimalen Dicke, für welche die Einstufung gewünscht wird, vorgeschrieben. Die Proben werden in horizontaler Position eingespannt und mit einer 20 mm langen blauen Flamme am freien Rand der Probe in einem Winkel von 45 Grad für ca. 30 Sekunden beaufschlagt, bis die Verbrennung eine vormarkierte Linie erreicht, die 25 mm vom Rand des Probekörpers entfernt ist. Nach Entfernen der Flamme wird die Brandgeschwindigkeit danach berechnet, wie viel Zeit die Verbrennungsfront von der 25-mm-Linie bis zu einer vormarkierten 100-mm-Linie benötigt. Wenigstens drei Probekörper werden auf diese Weise geprüft. Ein Kunststoff erhält eine HB-Einstufung, wenn eine Brandgeschwindigkeit von 40 mm/min für einen Probekörper von mehr als 3 mm Dicke oder von 75 mm/min für Stäbe, die weniger als 3 mm dick sind, nicht überschritten wird. Die Einstufung wird auch für Produkte verwendet, die keine Verbrennung bis zur 100-mm-Marke zeigen.

Amodel AS-1133 HS hat im horizontalen Flammtest bei einer Mindestdicke von 0,8 mm in der Farbe Schwarz die Einstufung 94HB erhalten.

### Vertikaler 50-W-Flammtest (20 mm)

Basierend auf Versuchsergebnissen, die durch die Verbrennung von vertikal eingespannten Probekörpern erzielt wurden, können Werkstoffe als V-0, V-1 oder V-2 eingestuft werden. Der vertikale 50-W-Flammtest (20 mm) ist anspruchsvoller als der HB-Test und wird bei Proben durchgeführt, die eine Länge von 125 mm, eine Breite von 13 mm und die für die jeweilige Einstufung gewünschte Dicke (normalerweise 0,8 mm oder 1,57 mm) besitzen. Die Proben werden in einer vertikalen Position eingespannt und mit einer blauen Flamme von 20 mm Höhe am unteren Rand des eingespannten Probekörpers beaufschlagt. Die Flamme wird 10 Sekunden lang angelegt und dann entfernt. Wenn der Probekörper aufhört zu brennen, wird die Flamme noch einmal für 10 Sekunden angelegt und dann wieder entfernt. Insgesamt werden fünf Stäbe auf diese Weise geprüft. In Tabelle 25 sind die Kriterien aufgeführt, nach denen ein Werkstoff in diesem Test eingestuft wird.



**Tabelle 25: UL-Kriterien zur Klassifizierung von Werkstoffen als V-0, V-1 oder V-2**

Kriterien	V-0	V-1	V-2
Nachbrenndauer für jeden einzelnen Probekörper ( $t_1$ oder $t_2$ )	$\leq 10$ s	$\leq 30$ s	$\leq 30$ s
Gesamte Nachbrenndauer für jedes Kriterium ( $t_1 + t_2$ für die fünf Probekörper)	$\leq 50$ s	$\leq 250$ s	$\leq 250$ s
Nachbrenn- und Nachglühdauer für jeden einzelnen Probekörper nach der zweiten Beflammung ( $t_2 + t_3$ )	$\leq 30$ s	$\leq 60$ s	$\leq 60$ s
Nachbrennen oder Nachglühen von jedem Probekörper bis zur Einspannbacke	Nein	Nein	Nein
Baumwollindikator entzündet durch flammende Teilchen oder Tropfen	Nein	Nein	Ja

### Vertikaler Flammtest (500 W)

Ein Werkstoff, der die Entflammbarkeitsanforderungen des vertikalen Flammtests (500 W) erfüllt, erhält eine Einstufung von 5VA oder 5VB. Dieser Test ist der anspruchsvollste der drei beschriebenen Prüfungen. Die Abmessungen der in diesem Test verwendeten geformten Stäbe sind identisch mit denen des vertikalen Flammtests (20 mm). Außerdem werden Platten mit den Maßen 150 mm x 150 mm und mit der für die Anwendung erforderlichen maximalen und minimalen Dicke benötigt. Die Stäbe werden in einer vertikalen Position eingespannt und mit einer Flamme von 125 mm Höhe fünf Mal für jeweils fünf Sekunden mit fünfsekündigen Pausen dazwischen beaufschlagt. Die Platten werden in einer horizontalen, flachen Position eingespannt und an der Unterseite mit einer Flamme von 125 mm Höhe in einem Winkel von 20° mit den gleichen Flammzeiten wie die Stäbe beaufschlagt. In Tabelle 26 sind die Kriterien für eine 5VA- bzw. 5VB-Klassifizierung aufgeführt.

In Tabelle 27 sind die aktuellen UL 94-Klassifizierungen einiger Amodel-Polymere aufgeführt. Da sich die Klassifizierungen ändern können und ständig weitere Produkte klassifiziert werden, ist für aktuelle Angaben die Website der Underwriters Laboratories heranzuziehen.

**Tabelle 26: UL-Kriterien zur Klassifizierung von Werkstoffen 5VA bzw. 5VB**

Kriterien	5VA	5VB
Nachbrenn- und Nachglühdauer nach fünfter Beflammung für jeden einzelnen Probestab	$\leq 60$ s	$\leq 60$ s
Baumwollindikator durch flammende Teilchen oder Tropfen von einem Probestab entzündet	Nein	Nein
Durchbrennen (Loch) einer Probeplatte	Nein	Ja

**Tabelle 27: UL 94-Klassifizierungen von Amodel-PPA-Typen**

Typ	Farbe	Dicke (mm)	UL 94-Klassifizierung
AFA-4133 V0 Z	ALLE	0,75	V-0
		1,5	V-0
		3,0	V-0
AFA-6133 V0 Z	ALLE	0,75	V-0
		1,5	V-0
		3,0	V-0
AFA-6145 V0 Z	ALLE	0,75	V-0
		1,5	V-0
		3,0	V-0



# Elektrische Eigenschaften

Viele Anwendungen thermoplastischer Kunststoffe beruhen auf ihrer Fähigkeit als elektrische Isolatoren zu funktionieren. Zur Bestimmung bestimmter Aspekte des Materialverhaltens in elektrischen Anwendungen wurden zahlreiche verschiedene Prüfmethode entwickelt. Im Folgenden eine kurze Beschreibung einiger der gebräuchlichsten Prüfmethode:

## Dielektrische Durchschlagspannung und Durchschlagfestigkeit (ASTM D149)

Die Durchschlagfestigkeit ist ein Maß für die Fähigkeit eines Materials, hohen elektrischen Spannungen ohne Verlust von isolierenden Eigenschaften zu widerstehen. Sie wird gemessen, indem ein Probekörper zwischen zwei Elektroden platziert und die angelegte Spannung erhöht wird, bis es zum dielektrischen Durchschlag kommt. Die Durchschlagfestigkeit wird bei der höchsten Spannung vor dem Versagen aufgezeichnet. Eine der Methoden in ASTM D149 – UL 746A – legt für den Kurzzeittest eine gleichmäßige Erhöhung der Spannung um 500 V pro Sekunde fest.

Auch wenn die Ergebnisse in kV/mm angegeben werden, ist die Durchschlagfestigkeit abhängig von der Dicke, dem Feuchtigkeitsgehalt und der Temperatur. Daher sind Werte für verschiedene Werkstoffe nur bei gleicher Probekörperdicke, bei gleichem Feuchtigkeitsgehalt und bei gleicher Testtemperatur vergleichbar.

In Tabelle 28 sind die Durchschlagfestigkeitswerte mehrerer Amodel-Typen aufgeführt. Die Durchschlagfestigkeit der mit 50 % RL konditionierten Probekörper ist identisch mit der von spritzfrischen Probekörpern.

## Spezifischer Durchgangswiderstand (ASTM D257)

Der spezifische Durchgangswiderstand eines Werkstoffes wird als der elektrische Widerstand einer Kubikeinheit des Werkstoffes definiert. An das Material wird 1 Minute lang eine Gleichspannung von 500 Volt angelegt und der dabei durch das Material fließende Strom gemessen. Werkstoffe mit einem höheren spezifischen Durchgangswiderstand eignen sich besser als elektrische Isolatoren.

UL 746A schreibt vor, dass der Test an zwei Gruppen von Probekörpern ausgeführt wird: eine Gruppe wird 48 Stunden lang bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit konditioniert, die andere 96 Stunden lang bei 35 °C und 90 % relativer Luftfeuchtigkeit.

Der spezifische Durchgangswiderstand reagiert besonders empfindlich auf Temperaturänderungen und Änderungen des Feuchtigkeitsgrads. Daher sind Werte für verschiedene Werkstoffe nur bei gleichem Feuchtigkeitsgehalt und bei gleicher Temperatur vergleichbar. Werkstoffe mit Durchgangswiderständen von über  $10^8$  Ohm-cm werden als Isolatoren und die mit Werten von  $10^3$  bis  $10^8$  Ohm-cm als teilweise leitfähig angesehen.

**Tabelle 28: Durchschlagfestigkeit ausgewählter Amodel-Typen**

Typ	Zust. <sup>(1)</sup>	Dicke			
		3,2 mm		1,6 mm	
		kV/mm	V/mil	kV/mm	V/mil
A-1133 HS	trocken	21	533	32	813
A-1133 HS	50 % RL	21	533		
A-1145 HS	trocken	23	584		
A-1145 HS	50 % RL	23	584		
AS-4133 HS	trocken	21	533	32	813
AS-4133 HS	50 % RL	21	533		
AT-1002 HS	trocken	17	432		
AT-1002 HS	50 % RL	17	432		
AT-5001	trocken	17	432		
AT-5001	50 % RL	17	432		
AT-6115 HS	trocken			28	711
AFA-6133 V0 Z	trocken	24	610	27	686
A-1340 HS	trocken			32	813
AS-1566 HS	trocken			29	737

<sup>(1)</sup> Zustand: „trocken“ bedeutet spritzfrisch, „50 % RL“ bedeutet Feuchtigkeitsaufnahme gemäß der Beschreibung auf Seite 6.

## Oberflächenwiderstand (ASTM D257)

Der Oberflächenwiderstand eines Materials ist der elektrische Widerstand zwischen zwei Elektroden auf der Oberfläche eines Probekörpers. An das Material wird 1 Minute lang eine Gleichspannung von 500 Volt angelegt und der dabei entlang der Materialoberfläche fließende Strom gemessen. Auch wenn eine gewisse Materialdicke den Strom tatsächlich überträgt, ist sie zu dünn, um gemessen zu werden. Daher dient diese Angabe nur als Richtwert. Der Oberflächenwiderstand wird durch Oberflächenverschmutzung beeinflusst und gilt nicht als grundlegende Materialeigenschaft. UL schreibt hierfür die gleiche Probekörperkonditionierung vor wie für den spezifischen Durchgangswiderstand. Die Testdaten werden am besten zum Vergleich von Werkstoffen für Anwendungen herangezogen, bei denen Kriechstrom eine Rolle spielt.

**Tabelle 29: Spezifischer Durchgangswiderstand und Oberflächenwiderstand von Amodel-Polymeren**

Typ	Zust. <sup>(1)</sup>	Spezifischer Durchgangswiderstand (Ohm-cm)	Oberflächenwiderstand (Ohm)
A-1133 HS	trocken	1 x 10 <sup>16</sup>	1 x 10 <sup>15</sup>
A-1133 HS	50 % RL	2 x 10 <sup>15</sup>	
A-1145 HS	trocken	1 x 10 <sup>16</sup>	
A-1145 HS	50 % RL	2 x 10 <sup>15</sup>	
AS-4133 HS	trocken	1 x 10 <sup>16</sup>	1 x 10 <sup>15</sup>
AS-4133 HS	50 % RL	5 x 10 <sup>14</sup>	
AT-1002 HS	trocken	1 x 10 <sup>16</sup>	8 x 10 <sup>13</sup>
AT-1002 HS	50 % RL	7 x 10 <sup>14</sup>	2 x 10 <sup>13</sup>
AT-5001	trocken	4 x 10 <sup>15</sup>	4 x 10 <sup>15</sup>
AT-5001	50 % RL	2 x 10 <sup>15</sup>	2 x 10 <sup>15</sup>
AT-6115 HS	trocken	1 x 10 <sup>16</sup>	1 x 10 <sup>15</sup>
AFA-6133 V0 Z	trocken	1 x 10 <sup>16</sup>	1 x 10 <sup>15</sup>
A-1240 L	trocken	9 x 10 <sup>15</sup>	
A-1240 L	50 % RL	2 x 10 <sup>15</sup>	
A-1340 HS	trocken	1 x 10 <sup>16</sup>	
A-1340 HS	50 % RL	1 x 10 <sup>16</sup>	1 x 10 <sup>15</sup>
A-1565 HS	trocken	4 x 10 <sup>14</sup>	
AS-1566 HS	trocken	1 x 10 <sup>16</sup>	1 x 10 <sup>15</sup>

<sup>(1)</sup> Zustand: „trocken“ bedeutet spritzfrisch, „50 % RL“ bedeutet Feuchtigkeitsaufnahme gemäß der Beschreibung auf Seite 6.

### Dielektrizitätskonstante (ASTM D150)

Die Dielektrizitätskonstante wird als das Verhältnis der Kapazität eines Kondensators mit dem Testmaterial als Dielektrikum und der Kapazität des gleichen Kondensators mit Vakuum als Dielektrikum definiert. Isolierstoffe werden auf zwei sehr unterschiedliche Weisen verwendet. Erstens, um Komponenten zu halten und voneinander und gegen Masse zu isolieren, und zweitens, um als Kondensatordielektrikum zu dienen. Im ersten Fall ist eine niedrige Dielektrizitätskonstante von Vorteil. Im zweiten Fall erlaubt eine hohe Dielektrizitätskonstante, den Kondensator kleiner zu dimensionieren. Dielektrizitätskonstanten ändern sich nachweislich schnell mit steigender Temperatur oder zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt, daher sind Werte für verschiedene Werkstoffe nur bei gleichem Feuchtigkeitsgehalt und bei gleicher Temperatur vergleichbar.

**Tabelle 30: Dielektrizitätskonstante von Amodel-Polymeren**

Typ	Zust. <sup>(1)</sup>	Frequenz			
		60 Hz	100 Hz	10 <sup>6</sup> Hz	10 <sup>9</sup> Hz
A-1133 HS	trocken	4,4	5,1	4,2	3,7
A-1133 HS	50 % RL	4,7		4,3	
A-1145 HS	trocken	4,6		4,4	
A-1145 HS	50 % RL	4,9		4,5	
AS-4133 HS	trocken	3,8	4,6	3,6	3,6
AS-4133 HS	50 % RL	4,3		3,4	
AT-1002 HS	trocken	3,3		3,3	
AT-1002 HS	50 % RL	3,8		3,8	
AT-5001	trocken	3,2		3,2	
AT-5001	50 % RL	3,6		3,6	
AT-6115 HS	trocken		4,0	3,3	3,1
AFA-6133 V0 Z	trocken		4,8	4,1	3,7
A-1240 L	trocken		4,2	4,0	
A-1240 L	50 % RL		4,4	4,0	
A-1340 HS	trocken		4,5	4,3	
A-1340 HS	50 % RL		4,5	4,3	3,8
AS-1566 HS	trocken		5,7	4,7	4,5

<sup>(1)</sup> Zustand: „trocken“ bedeutet spritzfrisch, „50 % RL“ bedeutet Feuchtigkeitsaufnahme gemäß der Beschreibung auf Seite 6.

### Dielektrischer Verlustfaktor (ASTM D150)

Der dielektrische Verlustfaktor (auch Verlusttangente oder tan delta genannt) ist ein Maß für den dielektrischen Verlust oder Energieverlust, wenn Wechselstrom Energie an einen Isolator abgibt. Im Allgemeinen sind niedrige Verlustfaktoren erwünscht, da sie einem besseren Dielektrikum entsprechen. Der dielektrische Verlustfaktor kann durch Verschmutzung, Testfrequenz, Temperatur und Feuchtigkeit beeinflusst werden.

### UL 746A: Elektrische Kurzzeiteigenschaften

Bestimmte elektrische Eigenschaften sind im Underwriters Laboratories (UL) Standard 746A unter dem Titel „Standard for Polymeric Materials Short-Term Property Evaluations“ aufgeführt und werden in Leistungsklassen, in sogenannten PLC-Einstufungen (Performance Level Category), angegeben. UL hat für jede Eigenschaft Testergebnisbereiche und entsprechende PLC-Einstufungen spezifiziert. Der gewünschten oder besten Leistung wird eine PLC von 0 zugeordnet, d. h., je besser das Verhalten in diesem Test, desto niedriger ist die PLC-Zahl.

**Tabelle 31: Dielektrischer Verlustfaktor von Amodel-Polymeren**

Typ	Zust. <sup>(1)</sup>	Frequenz			
		60 Hz	100 Hz	10 <sup>6</sup> Hz	10 <sup>9</sup> Hz
A-1133 HS	trocken	0,005		0,017	0,016
A-1133 HS	50 % RL	0,009		0,022	
A-1145 HS	trocken	0,005		0,016	
A-1145 HS	50 % RL	0,009		0,021	
AS-4133 HS	trocken	0,004		0,012	0,013
AS-4133 HS	50 % RL	0,020		0,019	
AT-1002 HS	trocken	0,004		0,016	
AT-1002 HS	50 % RL	0,018		0,035	
AT-5001	trocken	0,004		0,016	
AT-5001	50 % RL	0,012		0,027	
AT-6115 HS	trocken			0,013	0,011
AFA-6133 V0 Z	trocken			0,011	
A-1240L	trocken		0,006	0,017	
A-1240L	50 % RL		0,007	0,019	
A-1340 HS	trocken		0,005	0,017	
A-1340 HS	50 % RL		0,008	0,017	0,014
AS-1566 HS	trocken			0,011	0,011

<sup>(1)</sup> Zustand: „trocken“ bedeutet spritzfrisch, „50 % RL“ bedeutet Feuchtigkeitsaufnahme gemäß der Beschreibung auf Seite 6.

**Tabelle 32: Dry Arc Resistance (ASTM D495) PLC-Einstufung**

Wertebereich (s)		Zugeordnete PLC
≥	<	
420		0
360	420	1
300	360	2
240	300	3
180	240	4
120	180	5
60	120	6
0	60	7

**Tabelle 33: Comparative Tracking Index PLC-Einstufung**

Wertebereich (Volt)		Zugeordnete PLC
≥	<	
600		0
400	600	1
250	400	2
175	250	3
100	175	4
0	100	5

### Dry Arc Resistance (ASTM D495)

Bei diesem Test wird die Zeit in Sekunden gemessen, in der sich ein 12.500-V-Lichtbogen zwischen zwei Wolfram-Stabelektroden auf der Oberfläche eines Materials ausbreitet. Der Test wird mit zunehmender Intensität gemäß einem vorgeschriebenen Ablauf ausgeführt, bis sich ein elektrisch leitender Pfad oder Kriechweg gebildet hat. Der Test soll Betriebsbedingungen in Wechselstromschaltkreisen mit Hochspannung und Schwachströmen von weniger als 0,1 Ampere simulieren. Tabelle 32 zeigt die Beziehung zwischen der Lichtbogenfestigkeit und der durch UL zugeordneten PLC-Einstufung.

### Comparative Tracking Index (CTI) (ASTM D3638)

Der Comparative Tracking Index ist definiert als die Spannung, die eine permanente, elektrisch leitende Kohlenstoffbrücke erzeugt, wenn 50 Tropfen eines Elektrolyten mit einem Tropfen alle 30 Sekunden auf den Probekörper aufgetragen werden. Der Test misst die Neigung eines Isolierstoffes zur Kriechwegbildung. Tabelle 33 zeigt die Beziehung zwischen der erhaltenen Spannung und der PLC.

### High Voltage Arc Tracking Rate (HVTR)

Dieser Test misst die Neigung eines Isolierstoffes, entlang seiner Oberfläche eine sichtbare leitende Kohlenstoffbrücke (Kriechweg) zu bilden, wenn wiederholt ein Hochspannungs-Schwachstromlichtbogen angelegt wird. Die HVTR ist die Geschwindigkeit (ausgedrückt in mm/Minute), mit der unter standardisierten Bedingungen auf der Oberfläche eines Materials ein elektrisch leitender Pfad gebildet wird. Dieser Test simuliert eine defekte Hochspannungs-Stromversorgung, wobei niedrigere Werte ein besseres Verhalten bedeuten. Tabelle 34 zeigt die HVTR-Werte und die entsprechende PLC.

## Hot Wire Ignition (HWI) (ASTM D3874)

Dieser Test misst die relative Beständigkeit eines Kunststoffes gegen Entzündung durch einen elektrisch erhitzten Draht. Ein Teil eines Probekörpers wird unter vorgeschriebenen Bedingungen mit einem Heizdraht umwickelt, durch den ein Strom mit einer linearen Leistungsdichte von 2,6 W/mm geleitet wird. Der Stromfluss wird aufrecht erhalten, bis sich der Probekörper entzündet, und die Zeit bis zur Entzündung wird aufgezeichnet.

Unter bestimmten Betriebs- oder Fehlerbedingungen werden Komponenten ungewöhnlich heiß. Wenn diese überhitzten Teile Isoliermaterialien berühren, können diese sich entzünden. Mit diesem Test soll die relative Beständigkeit eines Isolierstoffes gegen eine Entzündung unter solchen Bedingungen bestimmt werden. Tabelle 35 zeigt die HWI-Zeiten und die zugewiesene PLC.

## High Current Arc Ignition (HAI)

Dieser Test misst die relative Beständigkeit eines Isolierstoffes gegen Entzündung durch elektrische Lichtbögen. Unter bestimmten Bedingungen kann sich Isoliermaterial in der Nähe eines Lichtbogens befinden. Sind Intensität und Dauer der Lichtbögen sehr groß, kann sich der Isolierstoff entzünden. Bei diesem Test wird die Zahl der Lichtbögen mit 240 Volt und 32,5 Ampere auf der Oberfläche eines Materials gemessen, die zur Entzündung oder Bildung eines Loches erforderlich sind. Der Abstand zwischen den Elektroden wird mit einer Geschwindigkeit von 254 mm pro Sekunde vergrößert. Die zu verwendende Höchstzahl von Lichtbögen ist 200.

Bei diesem Test wird das Verhalten eines Isolierstoffes gemessen, der mit Lichtbögen in Kontakt kommt.

Tabelle 36 zeigt die Beziehung zwischen der Starkstromlichtbogenfestigkeit und der durch UL zugeordneten PLC-Einstufung.

## High-Voltage Arc Resistance to Ignition

Dieser Test bestimmt die Neigung eines Materials, der Entzündung oder der Bildung einer sichtbaren leitenden Kohlenstoffbrücke entlang seiner Oberfläche zu widerstehen, wenn ein Hochspannungs-Schwachstromlichtbogen angelegt wird. Der Hochspannungslichtbogen wird angelegt, bis es zur Entzündung kommt, ein Loch durch den Probekörper gebrannt ist oder 5 Minuten verstrichen sind. Wenn es zur Entzündung kommt, wird die Zeit bis zur Entzündung aufgezeichnet. Findet keine Entzündung statt, wird der Wert „> 300“ aufgezeichnet.

Die Beziehung zwischen der durchschnittlichen Zeit bis zur Entzündung und der durch UL zugeordneten PLC-Einstufung ist in Tabelle 37 angegeben.

**Tabelle 34: High Voltage Arc Tracking Rate PLC-Einstufung**

Wertebereich (mm/min)		Zugeordnete PLC
>	≤	
0	10	0
10	25,4	1
25,4	80	2
80	150	3
150		4

**Tabelle 35: Hot Wire Ignition PLC-Einstufung**

Wertebereich (s)		Zugeordnete PLC
<	≥	
	120	0
120	60	1
60	30	2
30	15	3
15	7	4
7	0	5

**Tabelle 36: High Current Arc Ignition PLC-Einstufung**

Wertebereich (s)		Zugeordnete PLC
<	≥	
	120	0
120	60	1
60	30	2
30	15	3
15	7	4
7	0	5

**Tabelle 37: High Voltage Arc Resistance to Ignition PLC-Einstufung**

HVAR – durchschnittliche Zeit bis zur Entzündung (s)		Zugeordnete PLC
<	≥	
	300	0
300	120	1
120	30	2
30	0	3

## Eigenschaften von Amodel-Polymeren nach UL 746A

In Tabelle 38 sind ausgewählte Eigenschaften nach UL 746A für ausgewählte Amodel-Typen aufgeführt. Die ausgewählten Typen werden am häufigsten als elektrische Isolatoren eingesetzt.

### Relative Temperaturindizes nach UL

Die relativen Temperaturindizes nach UL sind das Ergebnis von Wärmealterungsversuchen und sind daher im Abschnitt „Thermische Stabilität“ auf Seite 49 aufgeführt.

**Tabelle 38: PLC-Einstufungen nach UL 746A für Amodel-PPA-Typen**

Typ	mm <sup>(1)</sup>	HWI	HAI	HVTR	CTI
A(AS)-1133 HS	0,80	0	0	4	0
AT-6115 HS	0,80	0 <sup>(2)</sup>	0	1	0
AT-6130	0,80	4	0	1	0
AS-1566 HS	0,80	—	0	0	0
A-1340 HS	0,80	0 <sup>(2)</sup>	0	1	1
AS-4133 HS	0,80	0 <sup>(2)</sup>	0	1	0
AFA-4133 V0 Z	0,75	0	0	1	1
AFA-6133 V0 Z	0,75	0	0	1	1
AFA-6145 V0 Z	0,75	0	1	—	1

<sup>(1)</sup> Mindestdicke (mm)

<sup>(2)</sup> Dieser Wert wird bei einer Dicke von 1,5 mm gemessen.

# Beständigkeit gegen Umgebungseinflüsse

Wie bereits erwähnt, können die Leistungsmerkmale von Polymeren durch Umgebungseinflüsse verschlechtert werden. In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen von Umgebungseinflüssen, wie etwa Chemikalieneinwirkung, Hydrolyse-Faktoren sowie Gamma- und/oder Ultraviolettstrahlung, auf die Leistungsmerkmale von Amodel-Polymeren erläutert. Gegebenenfalls werden auch die Auswirkungen dieser Umgebungsfaktoren auf die Leistungsmerkmale von Konkurrenzprodukten zum Vergleich angegeben.

## Chemikalienbeständigkeit

Amodel-Polymere sind teilkristalline Polyphthalamide und verfügen, wie viele andere teilkristalline Polyamide, über eine ausgezeichnete Chemikalienbeständigkeit gegen gängige organische Lösungsmittel. Die chemische Struktur der Amodel-Polymere ist jedoch stark aromatisch, wodurch eine noch höhere Chemikalienbeständigkeit gegen noch mehr Chemikalien erzielt wird.

Die genaue Auswirkung von chemischen Einflüssen auf ein Polymerteil lässt sich nur schwer vorhersagen, da das Reagenz, die Reagenzkonzentration, die Einwirkungszeit, die Reagenztemperatur, die Bauteiltemperatur und die Bauteilbelastung den Beanspruchungsgrad und die Veränderung der Leistungsmerkmale beeinflussen. Die einzige zuverlässige Methode zur Beurteilung der Auswirkungen einer chemischen Beanspruchung auf die Leistungsmerkmale eines Polymerteils ist ein Prototypentest. Es werden jedoch häufig Eignungstests für allgemeine Richtwerte und Werkstoffvergleiche durchgeführt.

Für die Eignungsprüfung auf Chemikalienbeständigkeit wurden Zugprobteststäbe gemäß ASTM D638 Typ I 30 Tage lang bei den angegebenen Testtemperaturen in verschiedene Chemikalien eingetaucht. Als Werkstoff wurde der 33%-glasfaserverstärkte Typ Amodel AS-1133 HS verwendet. Die entsprechenden Daten für 33%-glasfaserverstärktes PA 6,6 und 30%-glasfaserverstärktes Polyethylenterephthalat (PET) sind zum Vergleich ebenfalls angegeben.

**Tabelle 39: Legende zur Einstufung der Chemikalienbeständigkeit**

Symbol	Einstufung	Reduzierung der Zugfestigkeit (%)
A	Ausgezeichnet	≤ 10
Z	Zufriedenstellend	≤ 50 aber ≥ 10
U	Unzulässig	> 50

Das Materialverhalten wurde gemäß Tabelle 39 bewertet. Neben der Leistungsbewertung sind Daten zur prozentualen Änderung von Zugfestigkeit, Länge und Gewicht angegeben.

Die für die Eignungstests verwendeten Chemikalien wurden in drei Gruppen unterteilt:

- Organische Lösungsmittel (Tabelle 40)
- Wässrige Lösungen (Tabelle 41)
- Kfz-Flüssigkeiten (Tabelle 42)

Der Eignungstest mit wässrigen Lösungen bei erhöhten Temperaturen ergab bei allen drei geprüften Polymeren einen Verlust der Zugfestigkeit. Dieses Phänomen tritt bei allen glasfaserverstärkten Thermoplasten auf. Der Verlust der Zugfestigkeit von Amodel AS-1133 HS in deionisiertem Wasser bei 93 °C verläuft am Anfang aufgrund des Verlustes der Grenzflächenhaftung zwischen Glasfasern und Polymermatrix sehr schnell, verlangsamt sich aber dann auf eine Geschwindigkeit, die der Hydrolysewirkung entspricht. Wässrige Lösungen aus Frostschutzmittel oder Zinkchlorid haben eine ähnliche Wirkung. PA 6,6 wird von der Zinkchloridlösung stark beansprucht. PET wird von der Frostschutzmittellösung stark beansprucht und bei hohen Temperaturen sogar von destilliertem Wasser hydrolysiert.

**Tabelle 40: Eignungstests der Chemikalienbeständigkeit – organische Chemikalien**
**30-tägiges Eintauchen bei 23 °C**

Reagenz	Polymer	Einstufung	Beibehaltung der Zugfestigkeit (%)	Längen- änderung (%)	Gewichts- änderung (%)
Aceton	Amodel AS-1133 HS	A	97	0,1	0,2
	33-%-GF-PA 6,6	A	99	0,2	0,2
	30-%-GF-PET	Z	72	0,3	3,2
Isopropanol	Amodel AS-1133 HS	A	99	0,0	0,2
	33-%-GF-PA 6,6	A	112	0,0	0,3
	30-%-GF-PET	A	109	0,0	0,3
Methanol	Amodel AS-1133 HS	Z	83	0,1	2,9
	33-%-GF-PA 6,6	Z	68	0,5	5,6
	30-%-GF-PET	A	96	0,1	0,5
Methylenchlorid	Amodel AS-1133 HS	A	94	0,0	1,1
	33-%-GF-PA 6,6	A	90	0,1	2,4
	30-%-GF-PET	Z	71	2,0	9,5
Methylethylketon	Amodel AS-1133 HS	A	103	0,0	0,1
	33-%-GF-PA 6,6	Z	113	0,0	0,1
	30-%-GF-PET	Z	72	0,1	3,0
Toluol	Amodel AS-1133 HS	A	101	0,0	0,1
	33-%-GF-PA 6,6	A	109	0,1	0,2
	30-%-GF-PET	A	91	0,1	1,6
1,1,1-Trichlorethan	Amodel AS-1133 HS	A	99	0,0	0,2
	33-%-GF-PA 6,6	A	110	0,0	0,2
	30-%-GF-PET	A	100	0,0	2,3
Trichlorethylen	Amodel AS-1133 HS	A	102	0,0	0,3
	33-%-GF-PA 6,6	A	97	0,0	0,4
Freon® 113	Amodel AS-1133 HS	A	96	0,0	0,1
	33-%-GF-PA 6,6	A	99	0,0	0,2
n-Heptan	Amodel AS-1133 HS	A	104	0,0	0,1
	33-%-GF-PA 6,6	A	96	0,0	0,2

Freon ist eine eingetragene Marke von E. I. duPont de Nemours and Company.



**Tabelle 41: Eignungstests der Chemikalienbeständigkeit – wässrige Chemikalienlösungen**
**30-tägiges Eintauchen bei der angegebenen Temperatur**

Reagenz	Konz.	Temperatur		Polymer	Einstufung	Beibehaltung der Zugfestigkeit (%)	Längenänderung (%)	Gewichtsänderung (%)
		°C	°F					
Ammoniumhydroxid	10%	23	73	Amodel AS-1133 HS	A	96	0,1	0,8
				33-%-GF-PA 6,6	Z	61	0,2	4,5
				30-%-GF-PET	A	95	0,2	0,4
Deionisiertes Wasser	100%	93	200	Amodel AS-1133 HS	Z	69	0,2	3,4
				33-%-GF-PA 6,6	Z	62	0,2	5,0
				30-%-GF-PET	U	19	0,0	2,4
Natriumchlorid	10%	23	73	Amodel AS-1133 HS	A	97	0,1	2,1
				33-%-GF-PA 6,6	Z	67	0,2	3,3
				30-%-GF-PET	A	98	0,0	0,3
Zinkchlorid	50%	93	200	Amodel AS-1133 HS	Z	66	0,1	4,8
				33-%-GF-PA 6,6	U	0	*	*
				30-%-GF-PET	Z	54	-0,1	0,6
Schwefelsäure	36%	23	73	Amodel AS-1133 HS	A	92	0,0	1,8
				33-%-GF-PA 6,6	U	0	*	*
				30-%-GF-PET	A	94	0,0	0,3
Natriumhydroxid	10%	23	73	Amodel AS-1133 HS	A	93	0,0	1,6
				33-%-GF-PA 6,6	Z	62	0,0	3,1
				30-%-GF-PET	Z	70	0,0	-4,2
Natriumhypochlorit	5%	23	73	Amodel A-1133 HS	A	94	0,0	1,4
				33-%-GF-PA 6,6	Z	57	0,0	-1,5
				30-%-GF-PET	A	94	0,0	0,4

\* = Nicht beständig

**Tabelle 42: Eignungstests der Chemikalienbeständigkeit – Flüssigkeiten aus dem Transportwesen**
**30-tägiges Eintauchen bei der angegebenen Temperatur**

Flüssigkeit	Temperatur		Polymer	Einstufung	Beibehaltung der Zugfestigkeit	Längenänderung	Gewichtsänderung
	°C	°F			(%)	(%)	(%)
50%ige Frostschutzmittellösung	104	220	Amodel AS-1133 HS	Z	77	0,2	5,6
			33-%-GF-PA 6,6	Z	54	0,3	8,3
			30-%-GF-PET	U	0	*	*
Bremsflüssigkeit	49	120	Amodel AS-1133 HS	A	99	0,0	0,4
			33-%-GF-PA 6,6	A	105	–0,1	0,2
			30-%-GF-PET	A	97	0,0	1,0
Dieselkraftstoff	23	73	Amodel AS-1133 HS	A	98	0,0	0,1
			33-%-GF-PA 6,6	A	100	0,0	0,3
			30-%-GF-PET	A	100	–0,1	0,0
Gasohol (10 % Ethanol)	23	73	Amodel AS-1133 HS	Z	86	0,0	1,4
			33-%-GF-PA 6,6	Z	65	0,1	3,5
			30-%-GF-PET	A	93	–0,1	0,7
Hydraulikflüssigkeit	49	120	Amodel AS-1133 HS	A	92	0,0	0,3
			33-%-GF-PA 6,6	A	103	0,0	0,3
			30-%-GF-PET	A	105	–0,1	0,1
Düsentreibstoff JP-4	23	73	Amodel AS-1133 HS	A	95	0,0	0,4
			33-%-GF-PA 6,6	A	100	0,0	0,3
			30-%-GF-PET	A	100	0,0	0,1
Motoröl	121	250	Amodel AS-1133 HS	A	100	0,0	0,1
			33-%-GF-PA 6,6	A	106	0,0	–0,2
			30-%-GF-PET	A	91	–0,1	–0,6
Servolenkungsöl	49	120	Amodel AS-1133 HS	A	97	0,0	0,1
			33-%-GF-PA 6,6	A	106	0,0	0,2
			30-%-GF-PET	A	108	0,0	0,0
Getriebeöl	121	250	Amodel AS-1133 HS	A	97	0,0	0,1
			33-%-GF-PA 6,6	A	105	–0,1	–0,2
			30-%-GF-PET	Z	64	0,1	–0,5
Benzin (bleifrei)	23	73	Amodel AS-1133 HS	A	96	0,1	0,0
			33-%-GF-PA 6,6	A	99	0,1	0,1
			30-%-GF-PET	A	99	0,0	0,1

\* = Nicht beständig

**Tabelle 43: Allgemeine Richtwerte zur Chemikalienverträglichkeit von Amodel-PPA-Polymeren**

Reagenz	Einstufung
Aliphatische Kohlenwasserstoffe	A
Aromatische Kohlenwasserstoffe	A
Öle	A
Fette	A
Chlorkohlenwasserstoffe	A
Methylenchlorid	Z
Chlor-Fluorkohlenwasserstoffe	A
Ketone	A
Ester	A
Höherwertigere Alkohole	A
Methanol	Z
Phenole	U
Starke Säuren	Z
Basen	A

**Tabelle 44: Auswirkung von Gammastrahlung auf Amodel AS-1133 HS**

Beibehaltung von (%)	5 mrad Bestrahlung
Zugfestigkeit (kPa)	620
Zugdehnung (%)	100

### Chemikalienverträglichkeit

Tabelle 43 vermittelt einen generellen Überblick über die Chemikalienbeständigkeit von Amodel-Polymeren. Diese Daten sind jedoch nur zur Beurteilung der allgemeinen Eignung zu verwenden. Wie bereits erwähnt, hängt das Verhalten von Amodel-Polymeren bei einer tatsächlichen Chemikalieneinwirkung von der mechanischen Beanspruchung, der Konzentration, der Zeit und/oder der Temperatur ab. Für zuverlässige Angaben zum Verhalten eines Werkstoffes wird empfohlen, Tests unter Bedingungen durchzuführen, die denen in der eigentlichen Anwendung möglichst ähnlich sind.

### Gammastrahlung

Amodel AS-1133 HS weist eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen Gammastrahlung auf. Tests mit spritzgegossenen Probestäben, die Gammastrahlen mit einer Dosis von 5,0 Megarad ausgesetzt wurden, ergaben keine wesentliche Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften von Amodel AS-1133 HS. Die Ergebnisse sind in Tabelle 44 aufgeführt.

Dieser Abschnitt enthält grundlegende Konstruktionsrichtlinien und allgemeine Empfehlungen, die Konstrukteuren bei der Entwicklung von Kunststoffteilen behilflich sein sollen, die die Preis-/Leistungsanforderungen der jeweiligen Anwendung erfüllen. Es werden Richtwerte zu den Auswirkungen von Spannungen angegeben, die durch Montage, Temperaturänderungen, Umgebungseinflüsse und Zeit in Bezug auf das Kriechverhalten verursacht werden.

Von den verschiedenen Werkstoffen, die Konstrukteuren zur Verfügung stehen, bieten Thermoplaste die größte Vielfalt, Vielseitigkeit und Designfreiheit. Kunststoffe können durchscheinend oder opak, starr oder elastisch, hart oder weich sein. Es sind Kunststoffe mit den verschiedensten Chemikalienbeständigkeiten erhältlich – von chemisch inert bis zur selektiven Löslichkeit in bestimmten Umgebungen. Für andere Eigenschaften, wie Festigkeit, Steifigkeit und Schlagzähigkeit sowie Schmierfähigkeit und thermische Beständigkeit ist ebenfalls eine große Vielfalt verfügbar. Es sind auch Blends und Legierungen möglich, die die Materialauswahl für eine bestimmte Anwendung weiter vergrößern.

Die Konstruktion mit Kunststoffen kann manchmal komplizierter erscheinen als mit Metallen. Die bei Kunststoffen gegebene Vielfalt der Produkte, Umwandlungsprozesse und Nachbearbeitungsmöglichkeiten (Schweißen, Einsätze, Bedrucken, Lackieren, Metallbedampfung) eröffnet dem Konstrukteur jedoch ungeahnte Möglichkeiten (siehe Tabelle 45).

Ein Konstrukteur mag versucht sein, ein Kunststoffteil herzustellen, das lediglich die Abmessungen eines Metallteils dupliziert, ohne jedoch die Vielseitigkeit des Werkstoffes und die mögliche Designfreiheit zu nutzen. Dieses Vorgehen kann zu ineffizienten Konstruktionen oder schwer zu fertigenden Teilen oder Teilen mit nicht gerade optimalen Leistungsmerkmalen führen.

In den folgenden Abschnitten werden die für die Konstruktion mit Kunststoffen relevanten Gebiete der mechanischen Konstruktion und Spannungsanalyse erläutert, wobei Kunststoff/Metall-Vergleiche und kunststoffspezifische Faktoren aufgeführt werden.

**Tabelle 45: Konstruktionsvorteile von Amodel-Polymer gegenüber Metallen**

Eigenschaften von Amodel-Polymeren	Konstruktionsvorteil
Amodel-Polymere werden im Spritzgussverfahren verarbeitet, was eine erhebliche Freiheit bei der Konstruktion zulässt.	Rippen, Nocken oder Kerne lassen sich ohne Weiteres integrieren. Schnappverbindungen können für eine leichtere Montage eingeformt werden. Viele Nachbearbeitungsvorgänge wie Bohren, Gewindeschneiden, Lochen, Entgraten und Abschleifen können entfallen. Bei Bedarf können ohne Weiteres Metalleinsätze verwendet werden, um die Teilefestigkeit zu optimieren. Konstruktive Details mehrerer Metallteile einer Baugruppe können zu einem einzigen Teil kombiniert werden, was die Montage vereinfacht und die Kosten senkt.
Amodel-Polymere sind thermoplastisch.	Teile können durch Ultraschall- oder Vibrationsschweißen anstatt mit Befestigungselementen verbunden werden. Farben können eingespritzt anstatt nachträglich als Lack aufgetragen werden.
Amodel ist beständig gegen Chemikalien.	Teile rosten nicht und sind korrosionsbeständig.

# Mechanische Konstruktionsfaktoren

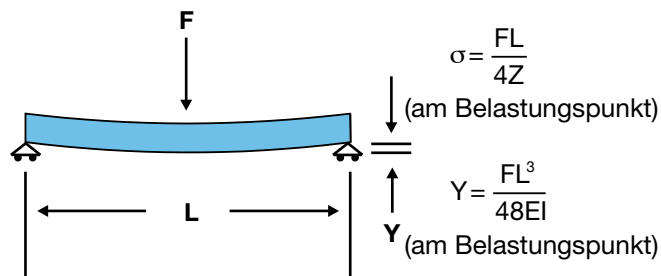
Die klassischen Spannungs- und Biegeformeln liefern die Anfangspunkte für die Teilekonstruktion. Die mechanischen Konstruktionsberechnungen für Amodel-Polymere ähneln denen anderer Werkstoffe. Wie bei allen Kunststoffen müssen bei der Analyse jedoch die viskoelastischen Eigenschaften des Werkstoffes berücksichtigt werden. Darüber hinaus können die Materialeigenschaften mit der Belastungsgeschwindigkeit, mit der Temperatur, mit der chemischen Umgebung und – bei faserverstärkten Kunststoffen – mit der Faserorientierung variieren. Daher muss die Analyse alle zu erwartenden Einsatzbedingungen entsprechend berücksichtigen. Wenn zum Beispiel die Einsatzbedingungen eine über längere Zeit andauernde Belastung mit sich bringen, muss der Kriechmodul anstelle des Kurzzeit-Elastizitätsmoduls verwendet werden. Oder wenn die Belastung zyklisch ist und über einen längeren Zeitraum anhält, ist die Ermüdungsfestigkeit bei der erwarteten Lebensdauer der begrenzende Faktor.

Der erste Schritt der Konstruktionsberechnung besteht darin, die Belastungen, denen das Teil ausgesetzt wird, zu bestimmen und die daraus resultierende Spannung und Verformung zu berechnen. Die Belastungen können von außen aufgebracht werden oder es kann sich um Belastungen infolge von Temperaturänderungen oder der Montage des Teils handeln.

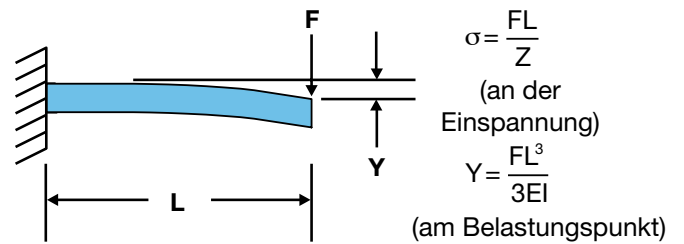
Eine äußere Belastung ist zum Beispiel das Gewicht eines medizinischen Instruments auf einem Sterilisiertablett. Beispiele für Montagebelastungen sind die Belastungen eines Gehäuseflansches, wenn er an einen Motor angeschraubt ist, oder die Belastung der Nabe einer Riemenscheibe, wenn ein Lager eingepresst wird. Thermische Spannungen können entstehen, wenn die Temperatur der Baugruppe zunimmt und sich die Abmessungen des Kunststoffteils stärker bzw. weniger stark ändern als die des Metallteils, an dem es befestigt ist.

**Tabelle 46: Formeln für maximale Spannung und Durchbiegung**

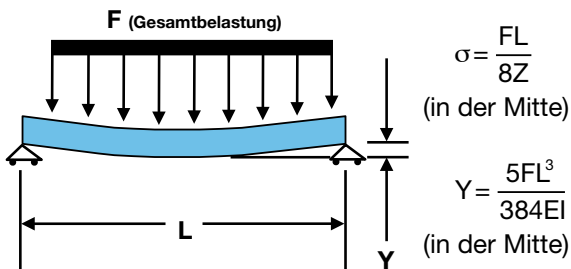
**Frei gelagerter Balken mit zentraler Punktbelastung**



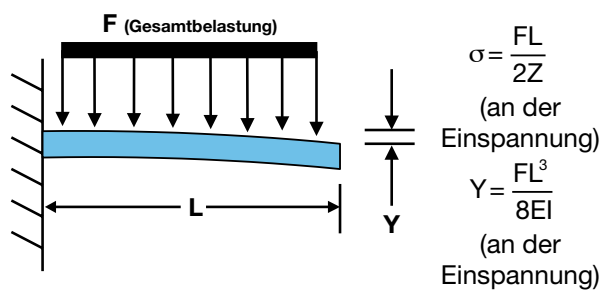
**Einseitig eingespannter Balken mit Punktbelastung am freien Ende**



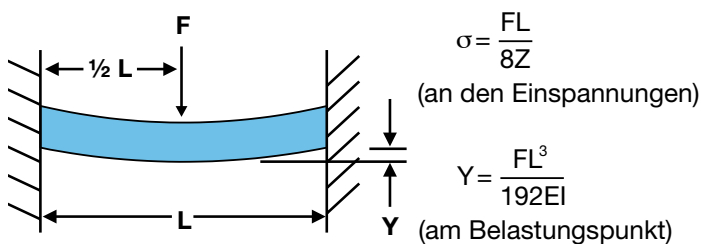
**Frei gelagerter Balken mit gleichförmig verteilter Flächenbelastung**



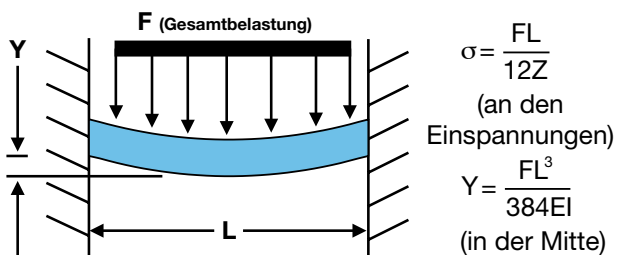
**Einseitig eingespannter Balken mit gleichförmig verteilter Flächenbelastung**



**Beidseitig eingespannter Balken mit zentraler Punktbelastung**

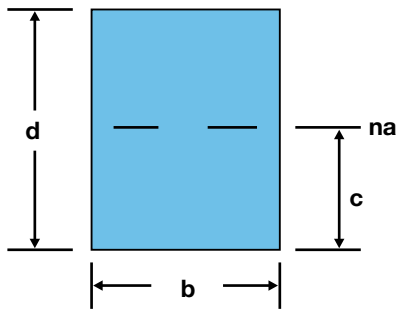


**Beidseitig eingespannter Balken mit gleichförmig verteilter Flächenbelastung**



**Tabelle 47: Flächen- und Momentformeln für ausgewählte Querschnitte**

### Rechteckig



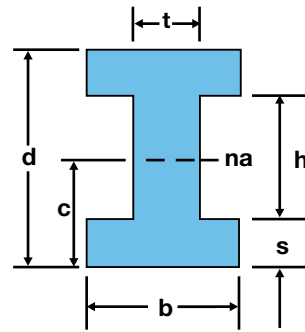
$$A = bd$$

$$c = \frac{d}{2}$$

$$I = \frac{bd^3}{12}$$

$$Z = \frac{bd^2}{6}$$

### I-Balken



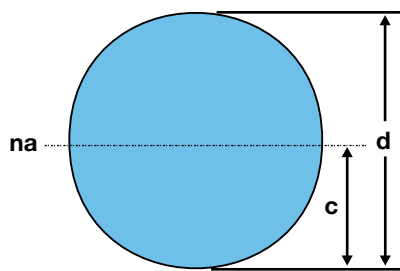
$$A = bd - h(b-t)$$

$$c = \frac{d}{2}$$

$$I = \frac{bd^3 - h^3(b-t)}{12}$$

$$Z = \frac{bd^3 - h^3(b-t)}{6d}$$

### Kreisförmig



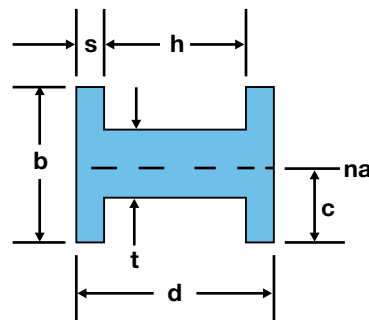
$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$c = \frac{d}{2}$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$Z = \frac{\pi d^3}{32}$$

### H-Balken



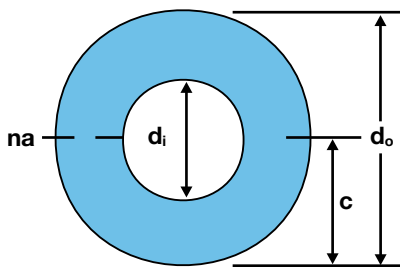
$$A = bd - h(b-t)$$

$$c = \frac{b}{2}$$

$$I = \frac{2sb^3 + ht^3}{12}$$

$$Z = \frac{2sb^3 + ht^3}{6b}$$

### Rohr



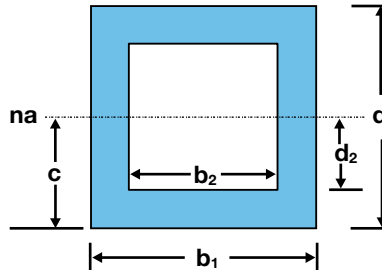
$$A = \frac{\pi(d_o^2 - d_i^2)}{4}$$

$$c = \frac{d_o}{2}$$

$$I = \frac{\pi(d_o^4 - d_i^4)}{64}$$

$$Z = \frac{\pi(d_o^4 - d_i^4)}{32d_o}$$

### Hohles Rechteck



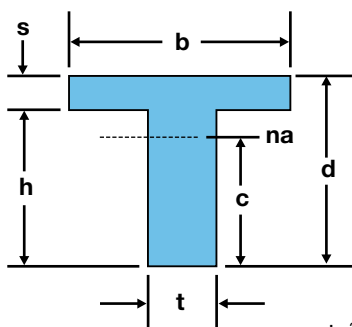
$$A = b_1d_1 - b_2d_2$$

$$c = \frac{d_1}{2}$$

$$I = \frac{b_1d_1^3 - b_2d_2^3}{12}$$

$$Z = \frac{b_1d_1^3 - b_2d_2^3}{6d_1}$$

### T-Balken oder Rippe



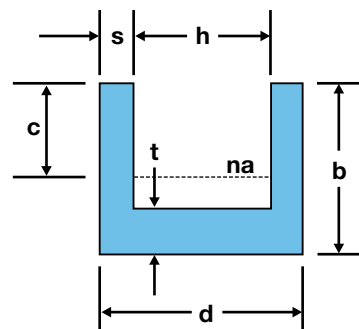
$$A = bs + ht$$

$$c = d - \frac{d^2t + s^2(b-t)}{2(bs + ht)}$$

$$Z = \frac{I}{c}$$

$$I = \frac{tc^3 + b(d-c)^3 - (b-t)(d-c-s)^3}{3}$$

### U-Balken



$$A = bd - h(b-t)$$

$$c = b - \frac{2b^2s + ht^2}{2A}$$

$$I = \frac{2b^3s + ht^3}{3} - A(b-c)^2$$

$$Z = \frac{I}{c}$$



# Anwendung klassischer Spannungs-Dehnungs-Formeln

Um die klassischen Formeln verwenden zu können, werden die folgenden Vereinfachungen angenommen:

- Das Teil kann als eine Struktur oder mehrere einfache Strukturen betrachtet werden.
- Das Material kann als linear-elastisch und isotrop angesehen werden.
- Die Belastung ist eine punkt- oder flächenförmige statische Belastung, die für kurze Zeit aufgebracht wird.
- Das Teil hat geringe Rest- oder Eigenspannungen.

Auch wenn nicht unbedingt alle diese Annahmen für eine bestimmte Situation genau zutreffen, können die klassischen Formeln dennoch einen Anfangspunkt für die Analyse liefern. Der Konstrukteur kann dann die Analyse entsprechend der Auswirkungen der vereinfachenden Annahmen anpassen.

Viele Teile können mit Hilfe eines Biegebalkenmodells analysiert werden. Tabelle 46 enthält die Formeln für maximale Spannung und Durchbiegung für einige ausgewählte Belastungen.

Die maximale Spannung ( $\sigma$ ) tritt an der Oberfläche des Balkens in der größten Entfernung von der neutralen Achse auf und wird mit folgender Formel beschrieben:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{Z}$$

wobei

$M$  = Biegemoment (Nm)

$c$  = Abstand von der neutralen Achse (m)

$I$  = Trägheitsmoment (m<sup>4</sup>)

$Z = \frac{I}{c}$  = Widerstandsmoment (m<sup>3</sup>)

Tabelle 47 enthält die Querschnittsfläche ( $A$ ), das Trägheitsmoment ( $I$ ), den Abstand von der neutralen Achse ( $c$ ) und das Widerstandsmoment ( $Z$ ) für einige allgemein übliche Querschnitte.

Für andere Querschnitte und/oder Geometrien können Angaben in Handbüchern zur Spannungsanalyse herangezogen oder es kann eine Finite-Elemente-Analyse verwendet werden.

## Grenzen der Konstruktionsberechnungen

Die Konstruktionen, die man durch Anwendung der klassischen mechanischen Konstruktionsformeln erhält, sind gute Anfangspunkte, jedoch werden einige wichtige Faktoren bei diesen Analysen nicht ausreichend berücksichtigt. Die viskoelastischen Eigenschaften

von Polymeren beschränken beispielsweise die Anwendung einiger Konstruktionsformeln auf Fälle mit geringer Durchbiegung. Der Berechnung der maximalen Spannung liegen häufig eine Reihe von vereinfachenden Annahmen zugrunde, die die Zuverlässigkeit der Ergebnisse verringern können. In anderen Fällen kann es sich bei der zu erwartenden Versagensart um Ausbeulen oder Scheren handeln, für die kaum entsprechende Materialeigenschaftswerte verfügbar sind.

Auch hängt die Schlagfestigkeit einer Konstruktion von deren Fähigkeit ab, Schlagenergie aufzunehmen, ohne dass ein Bruch entsteht. Und die Fähigkeit einer Konstruktion, Energie aufzunehmen, ist nur schwer vorherzusagen. Selbst wenn die Anforderungen an die Energieaufnahmefähigkeit bekannt sind, fehlen die praktischen Zähigkeitskonstanten für technische Polymere. Die Ergebnisse von Laborversuchen variieren – selbst bei fester Geometrie – mit der Art und Geschwindigkeit des Schlagtests. Daher muss die Fähigkeit der Konstruktion, Schlagbeanspruchungen zu widerstehen, mit Hilfe von Prototypen getestet werden.

Ebenso ändern sich die Ergebnisse von Ermüdungsversuchen mit der für den Test ausgewählten Lastspielfrequenz, der Testdynamik und dem verwendeten Probekörper. Sie dürfen daher nur als grober Richtwert für das Wechselbelastungsverhalten eines Werkstoffes angesehen werden.

## Durchbiegungsberechnungen

Zur Berechnung der Durchbiegung eines Konstruktionsvorschlags mit den klassischen Formeln wird ein Wert für den Elastizitätsmodul benötigt. Es muss unbedingt der richtige Wert verwendet werden. Der Wert muss dem Modul des Werkstoffes bei oder im Bereich der für die Anwendung erwarteten Temperatur und Feuchtigkeit entsprechen. In den Tabellen mit typischen Eigenschaften auf den Seiten 7 bis 20 sind Werte für Raumtemperatur und hohe Temperaturen aufgeführt. Bei Dauerbelastung ist der Schein- oder Kriechmodul zu verwenden. Werte dafür sind in den isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagrammen in den Abbildungen 44 und 45 auf Seite 34 angegeben.

## Spannungsberechnungen

Nachdem der Konstrukteur die maximale Spannung berechnet hat, wird dieser Wert mit der entsprechenden Materialeigenschaft, d. h. mit der Zug-, Druck- oder Scherfestigkeit, verglichen. Bei dem Vergleich sind die Temperatur- und Feuchtigkeitsanforderungen der Anwendung zu beachten.

## Berücksichtigung der Verstärkungsfaserorientierung

Bei der Konstruktion mit Kunststoffen, insbesondere mit verstärkten Kunststoffen, muss sich der Konstrukteur der Auswirkungen von Füllstoffen und Verstärkungsfasern

auf die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffes bewusst sein. Bei der Verarbeitung gefüllter Kunststoffe richten sich die Fasern bzw. die langgestreckten Füllstoffe häufig parallel zur Fließrichtung aus. Dieses Handbuch enthält Angaben zu Materialeigenschaften in Fließrichtung und quer zur Fließrichtung (sofern angebracht).

Da die Konstruktion eines Teils und dessen Herstellung eng zusammenhängen, muss der Konstrukteur berücksichtigen, in welchen Abschnitten des Teils voraussichtlich eine Faserorientierung auftritt und welche Folgen sie für die Materialeigenschaften hat. Die Schwindung, die Festigkeit, die Steifigkeit und der Wärmeausdehnungskoeffizient ändern sich mit dem Längenverhältnis der Fasern (Verhältnis ihrer Länge zum Durchmesser) und mit dem Ausmaß der Faserorientierung. Senkrecht zur Faserorientierung verhalten sich die Fasern mehr wie Füllstoffe und nicht wie ein Verstärkungsmittel.

Bei der Verarbeitung von Polymeren kann es vorkommen, dass Schmelzefronten (sogenannte Bindenähte) aufeinander stoßen, beispielsweise wenn die Kunststoffschmelze um einen Kernstift herum fließt. Das Verstärkungsmittel im Kunststoff (sofern vorhanden) überquert die Bindenaht jedoch nicht. Daher weist die Bindenaht nicht die Festigkeit des verstärkten Polymers auf und kann manchmal sogar schwächer sein als das Matrixpolymer selbst. Diese Faktoren müssen bei der Konstruktion von Teilen aus verstärkten Kunststoffen berücksichtigt werden.

## Konstruktion von Teilen mit gleicher Steifigkeit

Manchmal möchte ein Konstrukteur ein Metallteil durch ein Kunststoffteil mit der gleichen Steifigkeit ersetzen. Es gibt zwei recht einfache Methoden für die Beibehaltung der Teilesteifigkeit, wenn ein Werkstoff durch einen anderen ersetzt wird – auch wenn die Werkstoffe unterschiedliche Elastizitätsmodule aufweisen.

Beim ersten Verfahren wird die Wanddicke erhöht, um die entsprechende Steifigkeit zu erzielen. Beim zweiten werden Rippen für eine noch höhere Steifigkeit verwendet. Im Folgenden wird jeweils ein Beispiel für jedes Verfahren aufgeführt.

### Änderung der Wanddicke

Die Biegeformeln in Tabelle 46 zeigen, dass die Durchbiegung immer proportional zur Belastung und zur Länge sowie umgekehrt proportional zum Elastizitätsmodul und zum Trägheitsmoment ist.

Wählt man z. B. einen beidseitig eingespannten Biegebalken mit konstanter Flächenbelastung, wird die Durchbiegung folgendermaßen berechnet:

$$Y = \frac{FL^3}{384EI}$$

Um mit zwei verschiedenen Werkstoffen die gleiche Steifigkeit zu erzielen, werden die Durchbiegungen daher wie folgt gleichgesetzt:

$$\left\{ \frac{FL^3}{384EI} \right\}_{\text{Metall}} = Y = \left\{ \frac{FL^3}{384EI} \right\}_{\text{Kunststoff}}$$

Da Belastung und Länge gleich bleiben sollen, ist  $FL^3$  auf beiden Seiten der Formel eine Konstante und es ergibt sich Folgendes:

#### Formel 1

$$\{EI\}_{\text{Metall}} = \{EI\}_{\text{Kunststoff}}$$

Das ist die Formel für die Berechnung der gleichen Steifigkeit mit unterschiedlichen Werkstoffen.

Angenommen, dass Metallteil ist aus Magnesium mit einem Elastizitätsmodul  $E$  von 44,8 GPa, das durch den Thermoplast Amodel AS-1145 HS mit einem Elastizitätsmodul von 13,8 GPa ersetzt werden soll. Das Trägheitsmoment  $I$  muss durch Erhöhen der Wanddicke des Teils oder durch Hinzufügen von Rippen erhöht werden.

Das Einsetzen der Werte für  $E$  in Formel 1 ergibt:

$$(44,8 \times 10^9)I_{\text{Metall}} = (13,8 \times 10^9)I_{\text{Amodel}}$$

$$3,25 I_{\text{Metall}} = I_{\text{Amodel}}$$

Gemäß Tabelle 47 ist das Trägheitsmoment für einen Rechteckquerschnitt:

$$I = \frac{bd^3}{12}$$

wobei „b“ die Breite und „d“ die Wanddicke ist. Setzt man dies in die Formel zur Bestimmung der erforderlichen Wanddicke ein, erhält man:

$$3,25 d^3_{\text{Metall}} = d^3_{\text{Amodel}}$$

Wenn „d“ für das Metallteil 2,54 mm beträgt, ist die erforderliche Dicke des Amodel-Teils:

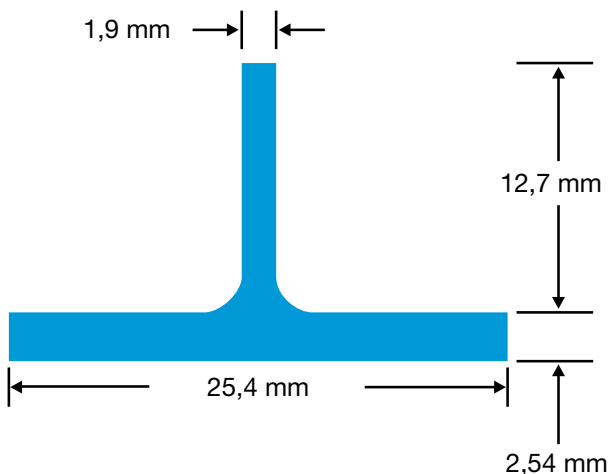
$$d_{\text{Amodel}} = \sqrt[3]{3,25(2,54)^3} = 3,76 \text{ mm}$$

d. h. 48 % dicker als das Magnesiumteil. Es können jedoch auch Rippen verwendet werden, um das Trägheitsmoment wirksam zu erhöhen (siehe den nächsten Abschnitt).

### Verwendung von Rippen zur Beibehaltung der Steifigkeit

Im letzten Abschnitt wurde errechnet, dass für den Ersatz eines Metallteils durch ein Spritzgussteil aus AS-1145 HS eine Teiledicke von 3,7 mm benötigt wird,

**Abbildung 68: Verwendung von Rippen zur Erhöhung der Steifigkeit**



um die Steifigkeit eines 2,5 mm dicken Magnesiumteils zu erzielen.

Durch die Integration von Rippen in die Amodel-Konstruktion können Wanddicke und Gewicht sehr effizient reduziert werden, aber das Amodel-Teil hat trotzdem die Steifigkeit des Magnesiumteils.

Zur Veranschaulichung kann das Trägheitsmoment ( $I$ ) der neuen Rippenkonstruktion mit dem der 3,7 mm dicken Plattenkonstruktion gleichgesetzt werden. Bei Wahl des gleichen Werkstoffes – Amodel AS-1145 HS – beträgt der Elastizitätsmodul in beiden Fällen 13,8 GPa. Wenn daher das Trägheitsmoment der Rippenkonstruktion gleich dem Trägheitsmoment der Plattenkonstruktion ist, haben die Teile die gleiche Durchbiegung und/oder Steifigkeit.

Tabelle 47 enthält das Trägheitsmoment ( $I$ ) für einen Rippenquerschnitt. Es wird vorausgesetzt, dass die Querschnittsbreite „b“ für beide gleich ist, und daher muss  $I_{\text{Rippe}}$  größer oder gleich  $I_{\text{Platte}}$  sein. Wählt man eine Wanddicke „b“ = 25,4 mm, kann das Trägheitsmoment einer Rippenkonstruktion berechnet werden, das diese Bedingung erfüllt.

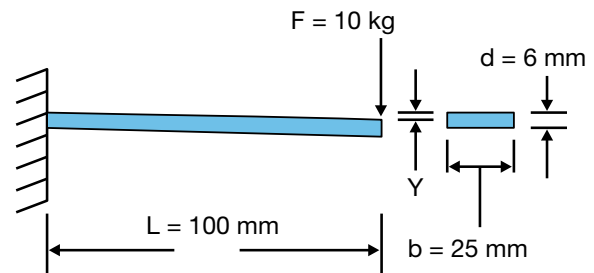
Das Trägheitsmoment der Plattenkonstruktion beträgt:

$$I_{\text{Platte}} = \frac{bh^3}{12} = \frac{2,54 \times (3,76)^3}{12} = 112,5 \text{ mm}^4$$

Nimmt man die in Abbildung 68 gezeigte willkürliche Rippenkonstruktion und stellt die entsprechenden Berechnungen an, erhält man folgendes Trägheitsmoment:

$$I_{\text{Rippe}} = 1379 \text{ mm}^4$$

**Abbildung 69: Beispiel für einen einseitig eingespannten Balken unter Biegebelastung**



Das heißt, die Rippenkonstruktion ist 9,5 Mal steifer als die Amodel-Plattenkonstruktion oder das ursprüngliche Magnesiumteil mit einer Dicke von 2,5 mm.

Die gleiche Rippe mit der halben Höhe würde immer noch ein Teil mit der doppelten Steifigkeit des Magnesiumteils ergeben. Die abgebildete Rippenkonstruktion erfordert alle 25 mm der Querschnittsbreite eine Rippe.

### Berechnung für Dauerbelastung

Bisher ging es bei den Spannungs-Dehnungs-Berechnungen und -Beispielen um das unmittelbare Spannungs-Dehnungs-Verhalten und daher um Kurzzeiteigenschaften. Wenn das betreffende Teil Belastungen über längere Zeit oder bei hohen Temperaturen aushalten muss, müssen Scheinmodulwerte (bzw. Kriechmodulwerte) verwendet werden, um die mögliche zusätzliche Dehnung und Durchbiegung des Teils zu berücksichtigen. Im Folgenden ein Beispiel für die Anpassung der Berechnungen für Dauerbelastung.

### Berechnung der Durchbiegung

Ein einseitig eingespannter Balken mit Rechteckquerschnitt (siehe Abbildung 69) wird mit einer Last von 10 kg am freien Ende belastet. Wie groß ist die Durchbiegung nach 1000 Stunden?

In Tabelle 46 auf Seite 65 wird die Durchbiegung eines einseitig eingespannten Balkens wie folgt angegeben:

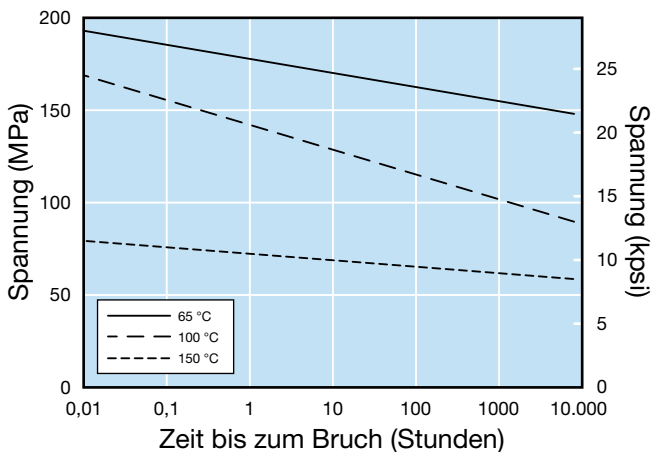
$$Y = \frac{FL^3}{3EI}$$

mit „I“, das Trägheitsmoment gemäß Tabelle 47:

$$I = \frac{bd^3}{12}$$

und „E“ ist der Biegemodul des Werkstoffes.

**Abbildung 70: Zug-Kriechbruch für Amodel A-1133 HS**



Die Berechnung des Trägheitsmoments für dieses Beispiel ergibt:

$$I = \frac{(25)(6)^3}{12} = 450 \text{ mm}^4$$

Im Datenblatt für Amodel A-1133 HS ist ein Biegemodul von 11,6 GPa angegeben. Mit diesem Wert und der oben angegebenen Formel kann die Kurzzeitdurchbiegung bei Raumtemperatur wie folgt berechnet werden:

$$Y = \frac{(10 \text{ kg} \times 9,8066)(0,1 \text{ m})^3}{3(11,6 \times 10^9 \text{ Pa})(4,5 \times 10^{-10} \text{ m}^4)}$$

$$Y = 6,3 \text{ mm}$$

Wenn die Anwendung eine Langzeitbelastung erfordert, ist aufgrund des Kriechverhaltens eine größere Durchbiegung zu erwarten. Um die Durchbiegung unter Berücksichtigung der Kriechneigung zu berechnen, wird anstatt dem Kurzzeit-Biegemodul der Scheinmodul verwendet. Der Scheinmodul von Amodel A-1133 HS bei 1000 Stunden (Abbildung 70) beträgt 7,58 GPa. Die berechnete Durchbiegung beträgt daher:

$$Y = \frac{(10 \text{ kg} \times 9,8066)(0,1 \text{ m})^3}{3(7,58 \times 10^9 \text{ Pa})(4,5 \times 10^{-10} \text{ m}^4)}$$

$$Y = 9,6 \text{ mm}$$

Die Durchbiegung ist bei Berücksichtigung einer Dauerbelastung ungefähr 50 % größer.

### Berechnung der zulässigen Spannung – Kriechbruch

Liegt eine Langzeitbelastung vor und sind Belastung und/oder Temperatur ausreichend hoch, kommt es aufgrund des Kriechverhaltens letztendlich zu einem Bruch des Teils.

Zur Abschätzung der erforderlichen Kombinationen von Zeit, Temperatur und Belastung, die zu dieser Art des Versagens führen, werden Kriechbruchversuche bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt (siehe Abbildung 70). Diese Abbildung zeigt die tatsächliche Zeit bis zum Versagen für verschiedene Spannungswerte, so dass eine Kriechbruch-Hüllkurve ermittelt werden kann. Anhand dieser Hüllkurve kann der Sicherheitsfaktor für Zeit oder Spannung für die betreffende Temperatur bestimmt werden.

Wenn beispielsweise die Lebensdauer der Anwendung für ein Spritzgussteil aus Amodel A-1133 HS 1000 Stunden bei 65 °C beträgt, gibt die Kurve an, dass innerhalb dieser Zeit ein Bruch eintritt, wenn das Teil einer Spannung von ungefähr 158 MPa ausgesetzt wird.

Wenn die Teilekonstruktion so geändert werden kann, dass die Spannung auf 124 MPa reduziert wird, liegt die voraussichtliche Zeit bis zum Bruch bei weit mehr als 10.000 Stunden. Daraus ergibt sich automatisch ein Sicherheitsfaktor für die Konstruktion. Es wird trotzdem empfohlen, ein reales Teil zu prüfen, um diese Ergebnisse zu bestätigen.

Bei Betriebstemperaturen, die von den Testtemperaturen abweichen, werden normalerweise Daten von bekannten Kriechbruch-Hüllkurven extrapoliert, um den Hüllkurvenwert der jeweiligen Temperatur anzunähern.

## Berücksichtigung von Spannungskonzentrationen

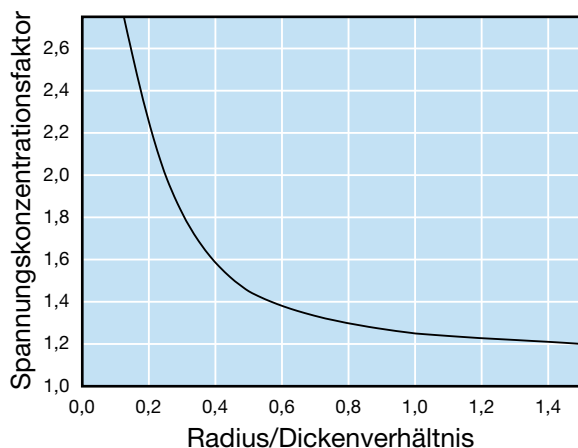
Bei der Anwendung der klassischen mechanischen Konstruktionsprinzipien kann sich eine Formteilkonstruktion ergeben, die vorzeitig oder bei einer viel niedrigeren Spannung versagt als erwartet. Die Ursache hierfür können Spannungskonzentrationen sein. Spannungskonzentrationen treten an spitzwinkligen Ecken, um Löcher herum oder an anderen besonderen Stellen des Teils auf. Spannungskonzentrationen wirken sich besonders auf das Schlag- und Ermüdungsverhalten aus.

Werden scharfkantige Ecken vermieden, können die Spannungskonzentrationen reduziert und somit Teile mit größerer struktureller Festigkeit erzielt werden. Um Probleme mit Spannungskonzentrationen zu vermeiden, sollte der innere Eckenradius wenigstens gleich der halben Nominalwanddicke sein. Ein Radius von 0,4 mm sollte als Minimum angesehen werden.

Abbildung 71 zeigt den Effekt des inneren Eckenradius auf den Spannungskonzentrationsfaktor. Wenn zum Beispiel die Nominalwanddicke 2 mm und der innere Eckenradius 0,5 mm betragen, ist das Radius/Wanddicken-Verhältnis 0,25 und der Spannungskonzentrationsfaktor liegt bei über 2. Eine Belastung  $x$  führt somit zu einer mehr als doppelt so hohen Belastung des Teils.

Für eine einheitliche Wanddicke sollten die äußeren Ecken einen Radius haben, der gleich der Summe des inneren Eckenradius und der Wanddicke ist.

**Abbildung 71: Spannungskonzentrationsfaktor bei inneren Ecken**



## Berücksichtigung von thermischen Spannungen

Wenn sich die Temperatur eines Kunststoffteils, das an Metall befestigt ist, ändert, können Spannungen entstehen, die bei der Teilekonstruktion berücksichtigt werden müssen.

Abbildung 72 zeigt einen typischen Kunststoffflansch, der mit einer Stahlschraube an einem Stahlrahmen befestigt ist. Da die Wärmeausdehnung des Kunststoffes wesentlich höher ist als die des Stahls, führt eine Temperaturerhöhung zu einer Erhöhung der Druckspannungen im Kunststoff und zu einer Zugspannung in der Schraube. Die Zunahme der Druckspannung unter der Scheibe muss hierbei berücksichtigt werden, wenn Kriechen und Verlust der Drehmomentbelastung der Schraube eine Rolle spielen.

Zum Beispiel ergibt sich die Längenänderung eines Materials bei Einwirkung einer Temperaturänderung folgendermaßen:

$$\Delta L = L (T_F - T_O) \alpha$$

wobei

$\Delta L$  = Längenänderung

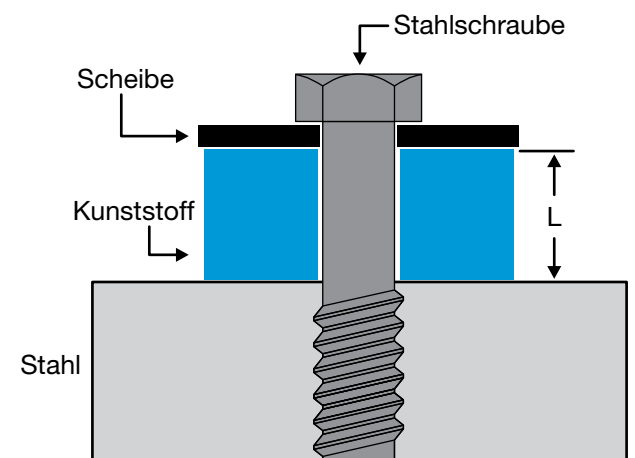
$L$  = Anfangslänge

$\alpha$  = Wärmeausdehnungskoeffizient

$T_F$  = Endtemperatur

$T_O$  = Anfangstemperatur

**Abbildung 72: Beispiel für thermische Spannungen**





Da der Kunststoff eingespannt ist, ergibt sich die Längenänderung (die Wärmeausdehnung und die mechanische Dehnung) der Einheit aus Stahlschraube und Kunststoffteil wie folgt:

$$\alpha_s(T_F - T_O) + \frac{F}{A_s E_s} = \alpha_p(T_F - T_O) - \frac{F}{A_p E_p}$$

wobei

$A_s$  = Querschnittsfläche der Schraube

$A_p$  = Querschnittsfläche der Scheibe

$E_s$  = Modul des Stahls

$E_p$  = Modul des Kunststoffes

$\alpha_s$  = Wärmeausdehnungskoeffizient des Stahls

$\alpha_p$  = Wärmeausdehnungskoeffizient des Kunststoffes

$F$  = Zunahme der Zugkraft der Schraube

Auflösung nach  $F$

$$F = \frac{(\alpha_p - \alpha_s)(T_F - T_O) A_s E_s}{1 + \frac{A_s E_s}{A_p E_p}}$$

und die Erhöhung der auf den Kunststoff wirkenden Druckspannung ist:

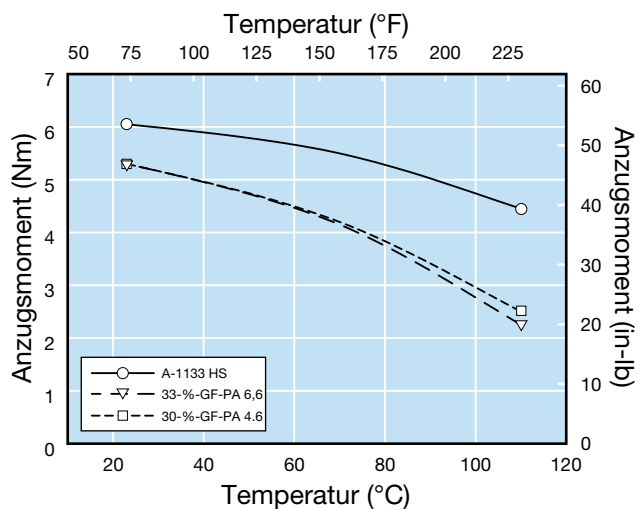
$$\sigma = \frac{F}{A_p}$$

### Verlust der Schraubverbindungsfestigkeit durch Kriechen

Wenn Metallschrauben verwendet werden, um Kunststoffteile an einer Baugruppe zu befestigen, und die Baugruppe wird Temperaturänderungen ausgesetzt, können die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Metall und Kunststoff Probleme verursachen. Wenn eine Schraube festgezogen wird, nimmt ihre Länge geringfügig zu und in ihrem Trägermaterial entsteht eine Druckspannung. Durch diese Druckspannung wird die Festigkeit der Schraubverbindung aufrechterhalten.

Wird die Baugruppe erwärmt, dehnen sich das Kunststoffteil und die Metallschraube aus. Das Kunststoffteil ist jedoch von der Metallschraube eingespannt und kann sich nicht ausdehnen. Das führt zu erhöhten Druckspannungen im Kunststoff sowie zu einem entsprechend erhöhten Druckkriechen oder zu einem Spannungsabbau. Durch den Abbau der Druckspannung wird das Anzugsmoment der Schrauben verringert.

**Abbildung 73: Beibehaltung des Schraubenanzugsmoments**



Zur Beurteilung dieser Tendenz wurden 6,4 mm dicke Platten aus Amodel A-1133 HS, aus 33-%-glasfaserverstärktem PA 6,6 und aus 30-%-glasfaserverstärktem PA 4,6 mit Maschinenschrauben aus Stahl an eine Metallfläche geschraubt. Die Schrauben wurden mit einem Drehmomentschlüssel mit einem Anzugsmoment von 6,8 Nm festgezogen, wobei die Kunststoffplatte unter dem Schraubenkopf zusammengedrückt wurde. Die Temperatur der verschraubten Baugruppen wurde auf die in Abbildung 73 gezeigten Temperaturen erhöht, eine Stunde lang gehalten und dann auf Raumtemperatur abgesenkt. Dann wurde das zum Lösen der Schrauben erforderliche Drehmoment gemessen.

In Abbildung 73 werden die Beibehaltungsraten der Schraubenanzugsmomente in Abhängigkeit von der Temperatur verglichen. Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient von Amodel-Polymer ist geringer als der von anderen geprüften Werkstoffen und liegt daher näher bei dem Wert von Stahl.

Der kleinere Unterschied bei der Wärmeausdehnung führt zu geringeren Stauchungsspannungen, die durch die Temperaturschwankung im eingespannten Teil entstehen. Das bedeutet eine reduzierte Kriechneigung und somit eine bessere Beibehaltung des Anzugsmoments bei derart verschraubten Baugruppen.

# Konstruktion für die Montage

## Presspassungen

Eine der kostengünstigsten Methoden zwei Teile zusammenzufügen ist die Presspassung. Die Verbindung wird erreicht, indem eine Welle in ein Loch eingepresst wird, dessen Durchmesser kleiner ist als der Durchmesser der Welle selbst. Die Differenz zwischen Naben- und Wellendurchmesser wird als Übermaß bezeichnet. Die Kraft, die die Verbindung aufrechterhält, ist hauptsächlich eine Druckbelastung auf die Welle, die von der Ringspannung in der Nabe resultiert, die durch das Einpressen der Welle erzeugt wird. Je nach Modul von Wellen- und Nabenmaterial kann auch die Druckbelastung in der Welle zur Stabilität der Verbindung beitragen. Die Spannung, die eine Presspassung zusammenhält, lässt (analog zum Kriechverhalten) mit der Zeit nach, da der Scheinmodul des Polymers mit der Zeit abnimmt.

## Berechnung des zulässigen Übermaßes

Das zulässige Übermaß zwischen Wellen- und Nabendurchmesser kann mit der folgenden allgemeinen Formel bestimmt werden:

$$I = \frac{S_d D_s}{F} \left\{ \frac{F + \nu_h}{E_h} + \frac{1 - \nu_s}{E_s} \right\}$$

und der Geometriefaktor wird mit der folgenden Formel angegeben:

$$F = \frac{1 + \left( \frac{D_s}{D_h} \right)^2}{1 - \left( \frac{D_s}{D_h} \right)^2}$$

wobei

$I$  = Übermaß

$S_d$  = Arbeitsspannung

$D_h$  = Naben-Außendurchmesser

$D_s$  = Wellendurchmesser

$E_h$  = Modul des Nabenmaterials

$E_s$  = Modul des Wellenmaterials

$\nu_h$  = Poisson-Zahl des Nabenmaterials

$\nu_s$  = Poisson-Zahl des Wellenmaterials

$F$  = Geometriefaktor

Sind Welle und Nabe aus dem gleichen Amodel-Typ, dann gilt:

$$E_h = E_s = E$$

und das Übermaß ist:

$$I = \frac{S_d}{E} D_s \left( \frac{F+1}{F} \right)$$

Ist die Nabe aus Amodel und die Welle aus Metall, dann ist das Übermaß:

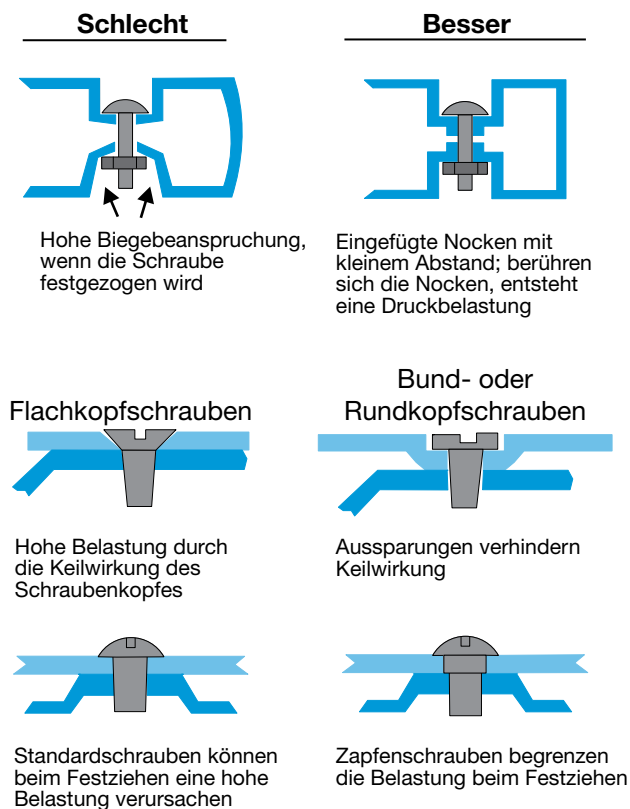
$$I = \frac{S_d D_s}{F} \frac{F + \nu_h}{E_h}$$

Wenn eine Presspassung mit verschiedenen Materialien verwendet wird, können Unterschiede in der Wärmeausdehnung das Übermaß zwischen Außen- und Innenteil erhöhen oder verringern. Dies kann die Spannung, die sich auf die Festigkeit der Verbindung auswirkt, ebenfalls erhöhen oder verringern.

Bei einer Presspassung kann es mit der Zeit zum Kriechen oder zu einem Spannungsabbau kommen. Dies kann zu einer Verringerung der Haltekraft führen. Daher wird dringend empfohlen, die Verbindung unter den zu erwartenden Betriebsbedingungen zu testen.



**Abbildung 74: Konstruktion mit mechanischen Verbindungselementen**



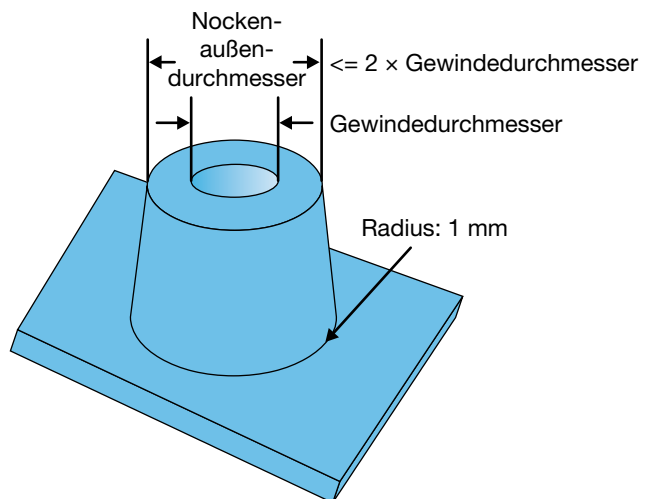
## Mechanische Verbindungselemente

Mechanische Verbindungselemente sind eine kostengünstige Option zum Verbinden unterschiedlicher Werkstoffe. Verbindungselemente, wie sie häufig bei Spritzgussteilen verwendet werden, sind Schrauben, Bolzen, Muttern, Sicherungsscheiben und Sicherungsmuttern. Werden mechanische Verbindungselemente verwendet, ist eine gute konstruktive Gestaltung notwendig, um eine Überbeanspruchung der Kunststoffteile durch die Verbindung zu vermeiden.

Das einfachste Verfahren zur Verhinderung von hoher Belastung bei der Montage ist das Festziehen der mechanischen Verbindungselemente mit einem Drehmomentschraubendreher. Kann das Anzugsmoment nicht kontrolliert werden (z. B. bei Außenmontagen), begrenzen Zapfenschrauben den Druck auf das Kunststoffteil. Es können auch Flachkopfschrauben, große Unterlegscheiben oder Ansatzscheiben verwendet werden. Abbildung 74 zeigt einige bevorzugte Konstruktionen mit mechanischen Verbindungselementen.

Bei Verwendung von Blechschrauben sind wiederholte Montage und Demontage zu vermeiden. Für eine wiederholte Montage werden gewindeformende Schrauben empfohlen.

**Abbildung 75: Nockenkonstruktion für Blechschrauben**



## Blechschrauben

Ein gängiges Verbindungselement bei Kunststoffen ist die Blechschraube. Blechschrauben schneiden oder formen Gewinde, wenn sie in den Kunststoff geschraubt werden, weshalb weder umspritzte Innengewinde noch eine maschinelle Nachbearbeitung zur Gewindeformung erforderlich sind. Die beiden Haupttypen sind gewindeformend und gewindeschneidend.

Bei der Wahl des geeigneten Blechschraubentyps für eine Anwendung spielt der Elastizitätsmodul des Kunststoffes eine wichtige Rolle. Für Kunststoffe mit einem Modul von weniger als 3,0 GPa (die meisten unverstärkten Polymere) sind gewindeformende Schrauben am besten geeignet, da der Kunststoff ausreichend duktil ist, um ohne Rissbildung oder Scheren verformt zu werden. Für glasfaser- und mineralstoffgefüllte Typen werden gewindeschneidende Typen bevorzugt.

Für ein optimales Eindrehmoment sollte der Lochdurchmesser des Nockens gleich dem Gewindedurchmesser der Schraube sein. Der Außendurchmesser des Nockens sollte das Zwei- bis Dreifache des Lochdurchmessers betragen und die Nockenhöhe sollte mehr als doppelt so groß wie die Nockendicke sein.

Abbildung 75 veranschaulicht die grundlegende Nockenkonstruktion zur Verwendung mit Blechschrauben.

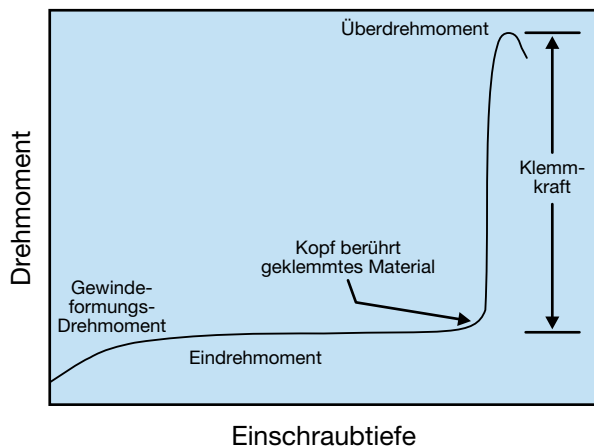
Um Überdrehung oder zu hohe Spannung zu vermeiden, sind bei Fließbandarbeiten Drehmomentschraubendreher einzusetzen.

## Verbesserung der Anzugsmoment-Beibehaltung

Um den Anzugsmomentverlust aufgrund von Kriechen zu minimieren, kann die Druckspannung unter dem Schraubenkopf folgendermaßen reduziert werden:

- Vergrößerung des Schraubenkopfdurchmessers
- Verwendung einer flachen Unterlegscheibe mit großem Durchmesser

**Abbildung 76: Beim Eindrehen von Schrauben entstehendes Drehmoment**



- Reduzierung des Klemmdrehmoments
- Verwendung einer Feder- oder Spiralscheibe
- Verwendung einer Zapfenschraube, um die Spannungen im Kunststoffteil zu reduzieren
- Verwendung einer Metallbuchse

### Anzugsmoment

Abbildung 76 zeigt, wie sich das Drehmoment in Abhängigkeit von der Einschraubtiefe der Schraube ändert. Das Anzugsmoment ist das empfohlene Einbaudrehmoment für die jeweilige Anwendung. Es muss hoch genug sein, damit das Schraubengewinde vollständig eingreifen und eine Klemmkraft entstehen kann. Es muss jedoch niedriger sein als das Drehmoment, das zum Versagen der Gewindegänge führen würde (Überdrehmoment).

Das optimale Anzugsmoment kann mit der folgenden Formel anhand des durchschnittlichen Eindrehmoments und des durchschnittlichen Überdrehmoments berechnet werden:

$$T_T = \frac{1}{2} \left( \frac{3}{2} T_D + \frac{1}{2} T_S \right)$$

wobei

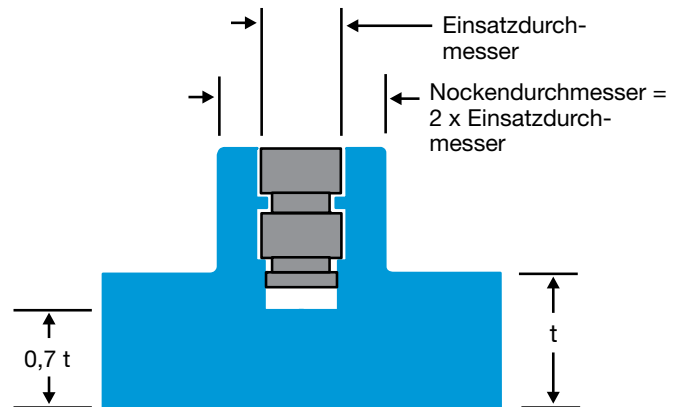
$T_T$  = Anzugsmoment

$T_D$  = Durchschnittliches Eindrehmoment

$T_S$  = Durchschnittliches Überdrehmoment

Bestimmte Blechschrauben sind speziell für die Verwendung mit Kunststoffen ausgelegt. Sie haben den Vorteil einer größeren Differenz zwischen Ein- und Überdrehmoment als die regulären, für Metall entwickelten Schrauben. Diese speziellen Verbindungselemente bieten einen zusätzlichen Sicherheitsfaktor für die automatische Montage.

**Abbildung 77: Nockenkonstruktion für Ultraschalleinsätze**



### Berechnung der Ausreißkraft

Die Festigkeit einer Verbindung zeigt sich auch durch die zum Ausreißen einer Schraube erforderlichen Kraft. Die Ausreißkraft kann mithilfe der folgenden Formel eingeschätzt werden:

$$F = \pi S D L$$

wobei

$F$  = Ausreißkraft

$S$  = Scherfestigkeit

$D$  = Gewindedurchmesser

$L$  = Gewindeeinschraublänge

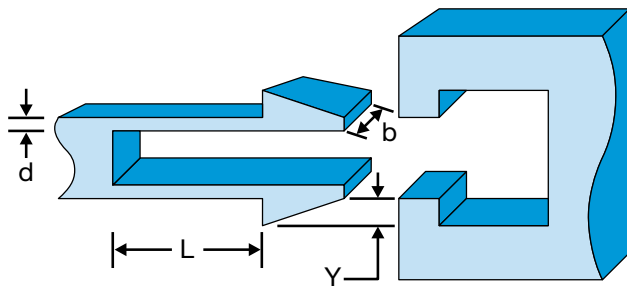
Wenn wiederholt Montage und Demontage notwendig oder zu erwarten sind, sollten Metallgewindeeinsätze anstatt Blechschrauben verwendet werden.

### Gewindeeinsätze

Mit Metallgewindeeinsätzen können solide Metallgewinde in ein Kunststoffteil eingearbeitet werden. Sie sind in zahlreichen verschiedenen Größen und Typen erhältlich. Gewindeeinsätze werden gewöhnlich in spritzgegossene Nocken eingebracht, die einen für den Gewindeeinsatz passenden Innendurchmesser haben. Die am häufigsten verwendeten Metalleinsätze werden entweder umspritzt oder in einem Nachbearbeitungsvorgang mit Ultraschall in das Teil eingefügt. Bei umspritzten Einsätzen wird der Einsatz im Werkzeug positioniert und der Kunststoff darum herum gespritzt. Wenn der Kunststoff um den Einsatz herum abkühlt, entstehen Spannungen. Um diese Spannungen zu reduzieren, sollten die Einsätze auf Werkzeugtemperatur vorgewärmt werden.

Ultraschalleinsätze werden in den Kunststoff eingepresst, indem der Kunststoff durch Hochfrequenzschwingungen von einem Ultraschall-Schweißgerät geschmolzen wird. Beim Ultraschallschweißen schmilzt Material um den Metalleinsatz, während er eingesetzt wird, so dass es zu einer normalerweise festen und relativ spannungsfreien Bindung zwischen Einsatz und Kunststoff kommt.

Abbildung 77 zeigt die empfohlene Einsatz- und Nockengestaltung für Amodel-PPA.

**Abbildung 78: Rasthaken-Schnappverbindung**

### Umspritzte Gewinde

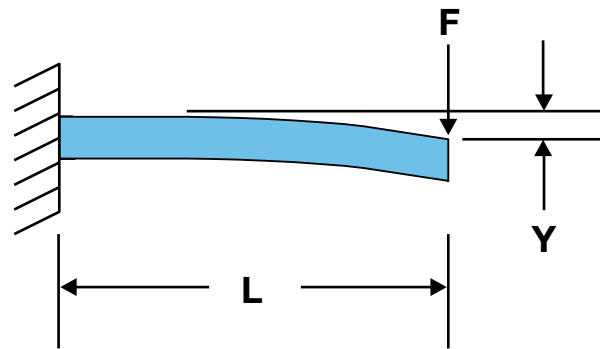
Einer der Vorteile der Verwendung von Kunststoffen anstelle von Metallen ist die Möglichkeit, Gewinde direkt im Teil zu formen. Dadurch erübrigt sich eine maschinelle Nachbearbeitung zum Bilden von Gewinden wie sie bei Metallteilen nötig ist. Bei umspritzten Gewinden kann es sich um Außen- oder Innengewinde handeln. Bei Innengewinden wird ein Ausschraub- oder Klappkern benötigt. Außengewinde lassen sich einfacher formen, wenn die Werkzeugtrennebene senkrecht zum Gewinde verläuft.

### Konstruktion mit Schnappverbindungen

Der Einsatz von Schnappverbindungen aus Kunststoff ist sehr weit verbreitet. Alle Schnappverbindungsausführungen erfordern, dass sich ein Kragarm aus Kunststoff wie eine Blattfeder biegt, während er sich an einem Übermaß am Gegenstück der Verbindung vorbeibewegt. Sobald der biegsame Kragarm das Übermaß passiert hat, kehrt er in seine normale, nicht gebogene und spannungsfreie Stellung zurück. Normalerweise ist an dem Kragarm eine Abstufung oder ein Vorsprung vorhanden, die bzw. der in dem Gegenstück einrastet, wodurch ein einfaches Montageverfahren ohne zusätzliche Teile ermöglicht wird. Siehe Abbildung 78.

Jeder Kragarm muss sich jeweils um einen Betrag „Y“ durchbiegen, um eingeführt werden zu können. Der Schlüssel zu einer guten Schnappverbindungskonstruktion liegt in der Einhaltung der Spannungs-Dehnungs-Grenzen des verwendeten Werkstoffes. Eine Schnappverbindungskonstruktion, die für einen duktilen Kunststoff mit niedrigem Modul verwendet wurde, eignet sich vermutlich nicht für einen extrem verstärkten, sehr steifen Kunststoff.

Bei steifen Werkstoffen kann die Länge des Kragarms erhöht oder die Übermaßdurchbiegung „Y“ reduziert werden. Durch Hinzufügen eines „Anschlags“ kann verhindert werden, dass der Kragarm bei der Montage zu weit durchgebogen wird.

**Abbildung 79: Einseitig eingespannter Balken – Punktbelastung am freien Ende**

### Formel für einen geraden, einseitig eingespannten Balken

Die Beziehung zwischen der maximalen Durchbiegung und der Dehnung eines geraden Kragarms (einseitig eingespannten Balkens) wird wie folgt berechnet: Der einseitig eingespannte Balken wurde aus Tabelle 46 ausgewählt und ist noch einmal in Abbildung 79 dargestellt. Die maximale Spannung ergibt sich wie folgt:

$$\sigma = \frac{FL}{Z}$$

Da dieser Balken einen Rechteckquerschnitt hat,

$$Z = \frac{bd^2}{6} \quad \text{und}$$

$$I = \frac{bd^3}{12}$$

Ergibt sich:

$$\sigma = \frac{FLd}{2I}$$

Die Durchbiegung „Y“ des Balkens wird wie folgt berechnet:

$$Y = \frac{FL^3}{3EI}$$

**Tabelle 48: Dehnungsempfehlungen für Rasthaken-Schnappverbindungen**

Typ	Maximale Dehnung (%)
ET-1000 HS	1,0
A-1230 L	0,5
AS-1133 HS	1,0

Durch Auflösen der Biegegleichung nach F kann die zum Durchbiegen des Balkens erforderliche Kraft wie folgt berechnet werden:

Formel 1

$$F = \frac{3YEI}{L^3}$$

Der Elastizitätsmodul E ist definiert als:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{und daher} \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Setzt man dies in die Spannungsformel für den einseitig eingespannten Balken ein, erhält man:

Formel 2

$$\varepsilon = \frac{FLd}{2EI}$$

Verwendet man die Beziehung von Formel 1 und setzt F in Formel 2 ein, erhält man die Beziehung zwischen Dehnung und Durchbiegung:

Formel 3

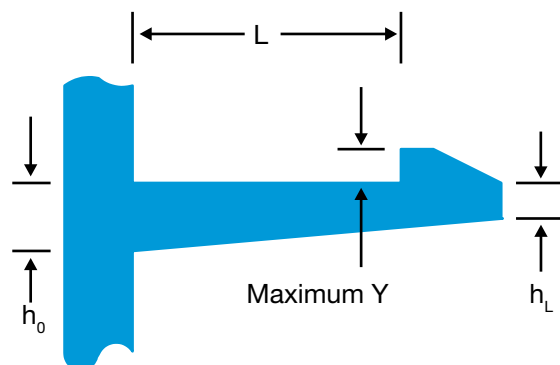
$$\varepsilon = \frac{3Yd}{2L^2}$$

Mit dieser Formel kann der Konstrukteur die erforderliche Dehnung anhand der maximalen Durchbiegung einer Konstruktion berechnen. Tabelle 48 enthält Empfehlungen für die maximale Dehnung für mehrere Amodel-Typen.

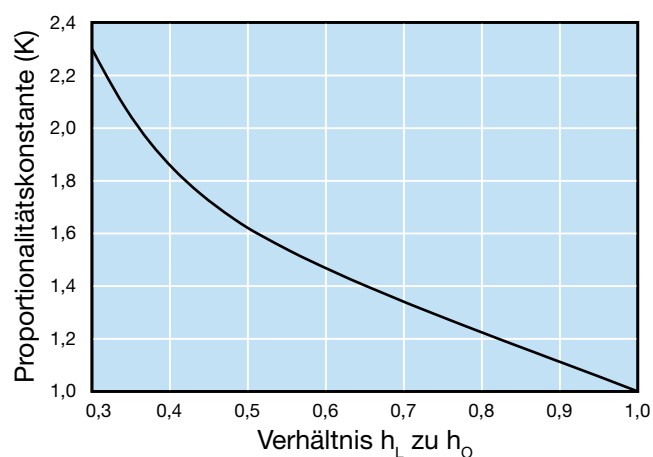
Sobald ein geeigneter Amodel-Typ ausgewählt ist, können die Grundformeln zur Ermittlung der Kraft F verwendet werden, die benötigt wird, um den Kragarm um das erforderliche Maß durchzubiegen.

Bei einer Rasthaken-Schnappverbindung sind Spannung und Dehnung am festen Ende des Kragarms am größten und nehmen in Richtung Spitze, auf die die Kraft einwirkt, proportional ab. Spannung und Dehnung können für jede beliebige Stelle durch Einsetzen eines anderen Werts für L (dem Abstand der Belastung vom festen Ende) berechnet werden. Wenn sich also der Kragarm vom festen Ende zur Spitze hin allmählich verjüngt, kann sich dieser Balken weiter durchbiegen als der Balken mit konstanter Dicke, ohne dass dabei eine höhere maximale Spannung entsteht. So kann die Belastbarkeit des Werkstoffes maximiert werden.

**Abbildung 80: Schnappverbindungsausführung mit einem sich verjüngenden Balken**



**Abbildung 81: Proportionalitätskonstante (K) für einen sich verjüngenden Balken**



### Formel für einen verjüngten, einseitig eingespannten Balken

Bei der in Abbildung 80 gezeigten verjüngten Ausführung ist  $h_L$  die Dicke am freien Ende. Der Wert der Proportionalitätskonstante K für einen sich verjüngenden Balken kann Abbildung 81 entnommen werden. Die maximale Dehnung kann folgendermaßen berechnet werden:

Formel 4

$$\varepsilon = \frac{3Yh_0}{2L^2K}$$

Wenn zum Beispiel die Balkendicke allmählich auf die Hälfte der Dicke am festen Ende reduziert wird, beträgt das Verhältnis von  $h_L$  zu  $h_0$  0,5 und K (aus Abbildung 81) ist 1,6. Daher werden die maximale Dehnung und die entsprechende Spannung mit dem Kehrwert von K (0,625) multipliziert. Die Dehnung wird um ungefähr 40 % der Dehnung eines einseitig eingespannten Balkens konstanter Dicke mit gleicher Durchbiegung verringert.

# Spritzgussgerechte Konstruktion

Viele der Anwendungen für Amodel-PPA-Polymere werden im Spritzgussverfahren hergestellt. Für eine Teilekonstruktion, die den Leistungsanforderungen der Anwendung entspricht, muss auch berücksichtigt werden, dass gewisse Aspekte der Teilekonstruktion die Spritzbarkeit beeinflussen können. Dazu gehören Wanddicke, Wanddickenänderungen, Entformungsschrägen, Rippen, Nocken und Kerne. Die Auswirkung dieser Aspekte auf die Spritzbarkeit muss vom Konstrukteur bedacht werden, bevor ein Werkzeug für die Herstellung des Teils gebaut wird.

## Wanddicke

Im Allgemeinen sollten Teile mit der dünnstmöglichen Wanddicke konstruiert werden. Sie muss aber gleichzeitig ausreichend Stabilität für die zu erwartende Belastung bieten, die Durchbiegung innerhalb der Konstruktionskriterien halten, ein angemessenes Füllverhalten zulassen und die Anforderungen bezüglich Entflammbarkeit und Schlagfestigkeit erfüllen. Derartig konstruierte Teile haben das kleinstmögliche Gewicht und daher die niedrigsten Materialkosten sowie den kürzesten Spritzzyklus.

## Wanddickenänderung

Teilekonstruktionen mit gleichmäßiger Wanddicke sind bestens für das Spritzgussverfahren geeignet. Sie minimieren Eigenspannungen, reduzieren das Risiko von Einfallstellen an der Teileoberfläche und schließen die Gefahr der Lunkerbildung im Formteil aus. Aufgrund von strukturellen, optischen oder entformungstechnischen Erwägungen können jedoch verschiedene Wanddicken erforderlich sein. Wenn Wanddickenänderungen notwendig sind, sollte der Konstrukteur einen allmählichen Übergang wie die abgeschrägte oder allmähliche Verjüngung in Abbildung 82 in Betracht ziehen.

Scharfe Übergänge können durch Unterschiede in der Abkühlgeschwindigkeit und durch turbulente Strömung zu Problemen beim Aussehen und bei der Dimensionsstabilität führen. Ein scharfer Übergang kann außerdem eine Spannungskonzentration verursachen, die die Leistungsfähigkeit des Teils unter Belastung oder Schlageinwirkung beeinträchtigen kann.

## Entformungswinkel

Um das Entformen zu erleichtern, werden Teile gewöhnlich mit einer Schräge konstruiert. Sobald das Werkzeug sich öffnet, schafft die Schräge einen Freiraum und ermöglicht es dem Teil, sich aus dem Werkzeug zu lösen. Die Schräge wird normalerweise als Entformungsschräge und der Betrag dieser Schräge als Entformungswinkel bezeichnet (siehe Abbildung 83).

Abbildung 82: Wanddickenübergang

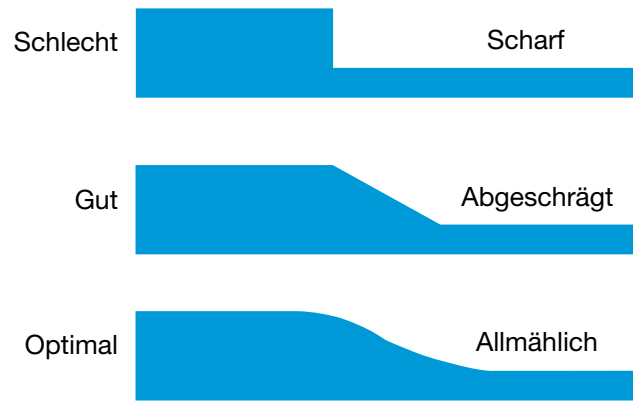
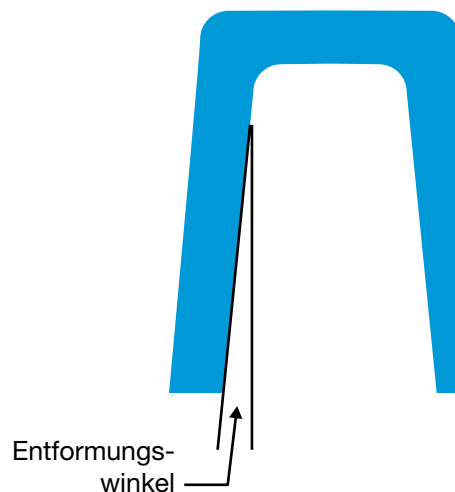


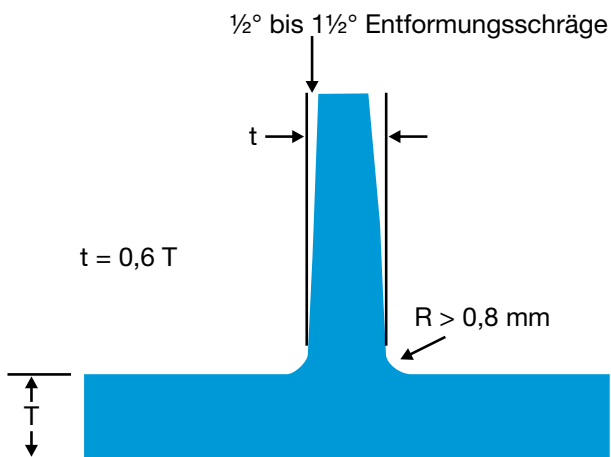
Abbildung 83: Entformungsschräge als Entformungshilfe



Angemessene Entformungswinkel werden verwendet, um das Teil leicht aus der Form lösen zu können. Im Allgemeinen sollte der Konstrukteur für Amodel-Polymere einen Entformungswinkel von  $0,5^\circ$  bis  $1^\circ$  sowohl für Innen- als auch für Außenwandungen vorsehen. In einigen Sonderfällen wurden jedoch geringere Entformungswinkel von  $\frac{1}{8}^\circ$  bis  $\frac{1}{4}^\circ$  bei polierten Werkzeugoberflächen verwendet.

Größere Entformungsschrägen sollten bei tiefer geschnittenen Teilen oder bei Kernen verwendet werden. Strukturierte Oberflächen erhöhen die notwendige Entformungsschräge um mindestens  $1^\circ$  pro 0,025 mm Strukturtiefe.

**Abbildung 84: Entformungsschräge –  
Empfehlungen für  
Rippenkonstruktion**



## Rippen

Die Steifigkeit einer Teilekonstruktion kann auch ohne größere Wanddicken, und zwar durch korrekt konstruierte und platzierte Rippen erhöht werden (siehe den Konstruktionsabschnitt „Verwendung von Rippen zur Beibehaltung der Steifigkeit“ auf Seite 68). Eine gut durchdachte Rippenkonstruktion ermöglicht eine Reduzierung der Wanddicke. Dadurch werden Material und Gewicht eingespart sowie die Spritzzyklen verkürzt. Zudem erübrigen sich dicke Wände, die Probleme wie Einfallstellen an der Teileoberfläche oder Lunker im Teileinneren verursachen können. Rippen, die richtig platziert sind, können auch als Fließhilfe dienen.

Die folgenden Richtlinien sollten bei einer Rippenkonstruktion generell befolgt werden. Die Dicke an der Grundfläche der Rippe sollte nicht mehr als 60 % der angrenzenden Wanddicke betragen. Wenn Rippen gegenüber sichtbaren Bereichen liegen, sollten sie so dünn wie möglich gehalten werden. In Teilbereichen, wo die Struktur wichtiger als das Aussehen ist, beträgt die Rippendicke häufig 75 oder sogar 100 % der äußeren Wanddicke. Sofern möglich, sollten Rippen stufenlos mit anderen Strukturelementen, wie z. B. Seitenwänden, Nocken und Halterungen, verbunden werden. Falls ein Teil mehrere Rippen enthält, müssen sie in Höhe und Breite nicht konstant sein und werden oft der Spannungsverteilung im Teil angepasst. Alle Rippen sollten pro Seite mindestens  $\frac{1}{2}^\circ$  Entformungsschräge aufweisen und einen Radius von mindestens 0,8 mm an der Grundfläche haben, um Spannungskonzentrationen und Einfallstellen zu reduzieren.

Abbildung 84 zeigt die empfohlenen Rippengeometrien.

## Verwendung von Kernen

Bei einer gut durchdachten Konstruktion sollte das ganze Teil eine gleichmäßige Wanddicke aufweisen. Dicke Abschnitte in einem Teil können die Zykluszeit verlängern, Einfallstellen an der Teileoberfläche und Lunker im Teileinneren verursachen sowie die Eigenspannungen erhöhen.

Dicke Abschnitte sollten ausgekernt werden, um eine gleichförmige Wanddicke zu erzielen. Aus Gründen der Vereinfachung und Kostenoptimierung bei Spritzgießwerkzeugen sollten die Kerne parallel zur Entformungsrichtung des Werkzeuges verlaufen. Bei anders ausgerichteten Kernen sind gewöhnlich zusätzliche Kernzugmechanismen notwendig.

Kerne in der Kavität sind hohem Druck ausgesetzt. Bei Blindkernen (nicht gestützten Kernen) mit einem Durchmesser von mehr als 1,5 mm sollte die Kernlänge das Dreifache des Durchmessers nicht überschreiten. Blindkerne mit einem Durchmesser von weniger als 1,5 mm sollten nicht länger sein als das Doppelte ihres Durchmessers. Diese Empfehlungen können bei durchlaufenden Kernen (Kernen, die sich teleskopartig bis zur gegenüberliegenden Werkzeugseite erstrecken oder mit dieser abschließen) verdoppelt werden. Bei allen Kernen sollten Entformungsschragen angebracht und alle Einzelteile sollten für ein optimales Auswerfen poliert werden.

## Nocken

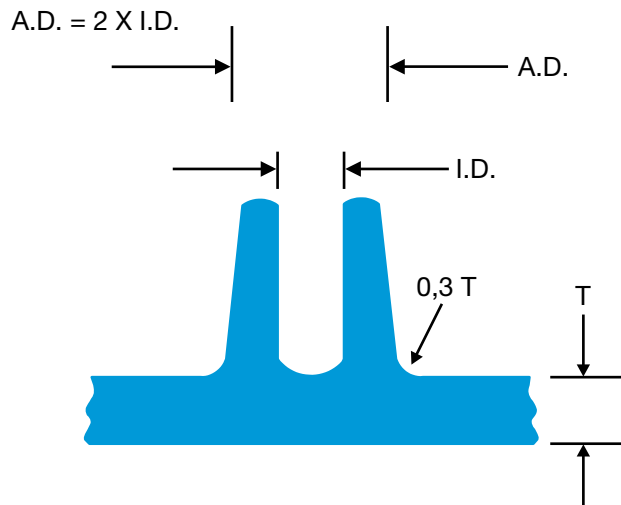
Nocken sind Erhebungen aus der eigentlichen Wand des Teils, die als Montage- oder Befestigungspunkte dienen. Die Nockengestaltung hängt hauptsächlich von ihrer Funktion im Teil ab. Ausgekernte Nocken können für Presspassungen, Blechschrauben oder Ultraschalleinsätze verwendet werden, die jeweils eine Belastung auf die Nockenwand ausüben.

Als allgemeine Richtlinie sollte der Nocken-Außendurchmesser doppelt so groß sein wie der Loch-Innendurchmesser und die Nocken-Wanddicke an der Grundfläche des Nocken sollte nicht mehr als 60 % der Teilwanddicke betragen, es sei denn, strukturelle Anforderungen haben Vorrang vor dem Aussehen. Abbildung 85 veranschaulicht diese Empfehlungen.

Zusätzliche Kräfte, die auf einen Nocken einwirken, können über ihn in die eigentliche Teilwand übertragen werden. Daher ist an der Nockengrundfläche ein Mindestradius von 25 % der Wanddicke erforderlich, um Festigkeit zu gewährleisten und Spannungskonzentrationen zu reduzieren. Ein Nocken kann außerdem durch die Verwendung von Anschlussflächen um den Nocken herum oder durch Verbindung mit einer entsprechend gestalteten Rippe an einer nahe gelegenen Wand weiter verstärkt werden. Nocken sollten auf die gleiche Weise konstruiert werden wie Rippen. Dickwandige Bereiche sollten vermieden werden, um Einfallstellen an der Teileoberfläche und Lunker im Teileinneren zu verhindern.



**Abbildung 85: Allgemeine Richtlinien für die Konstruktion von Nocken**



**Abbildung 86: Thermostatgehäuse mit sichtbaren Wulsten**



## Hinterschnidungen

Einige Konstruktionsmerkmale können – je nach Ausrichtung – dazu führen, dass Abschnitte des Werkzeugs das Auswerfen des Teils behindern. Solche Merkmale werden Hinterschnidungen genannt und können erfordern, dass spezielle Werkzeuganordnungen, wie etwa Gleitelemente oder Schieber, vor dem Ausstoßen verschoben werden müssen. In einigen Fällen ist der gespritzte Werkstoff so biegsam, dass das Teil ohne Schaden an der Hinterschneidung vorbei gedrückt werden kann.

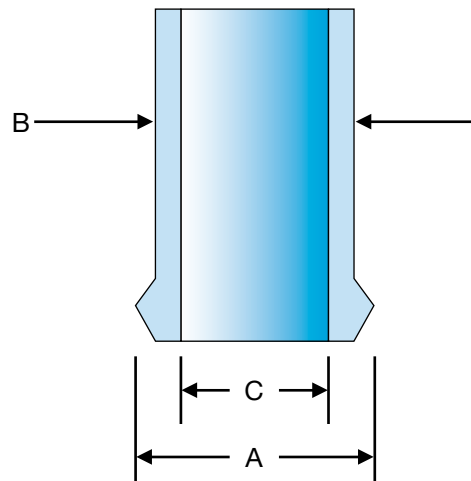
Beispielsweise hat ein typisches Kfz-Thermostatgehäuse (siehe Abbildung 86) Wulste für ein leckfreies Anschließen von Schläuchen. Damit eine glatte Oberfläche für den Schlauchanschluss vorhanden ist, hat der Konstrukteur festgelegt, dass die Trennebene nicht in diesem Bereich liegen darf. Daraus ergibt sich eine Hinterschneidung an jedem Wulst.

Unter bestimmten Umständen ist es vielleicht möglich, ein Teil mit Hinterschneidung auszustoßen, wenn der Kern zuerst ausgezogen werden kann und das Hinterschneidungsverhältnis nicht mehr als 8 beträgt.

$$\text{Hinterschneidungs-} \\ \text{verhältnis (R)} = \frac{100 (\text{Wulstdurchmesser [A]} - \text{Rohr-Außendurchmesser [B]})}{\text{Rohr-Innendurchmesser (C)}}$$

Falls das Teil ohne Schieber gespritzt werden muss und die Berechnung ein Hinterschneidungsverhältnis von mehr als 8 ergibt, sollte die Konstruktion geändert werden. Eine mögliche Änderung ist die Verjüngung des Rohrinneindurchmessers, so dass die Wanddicke unter dem Wulst verringert wird. Bei Rohren mit Innendurchmessern von weniger als 25 mm muss möglicherweise die Wulstgeometrie geändert werden, um ein Hinterschneidungsverhältnis von 8 oder weniger zu erzielen.

**Abbildung 87: Hinterschneidungsschema**



Der Erfolg dieses Vorgehens beruht auf der Entnahme des Teils aus dem Werkzeug, solange es noch heiß und daher biegsamer ist als bei Raumtemperatur.



## Schweißen

Bauteile aus Amodel-Polymeren können ohne Weiteres mit Heizelementschweißen, Vibrationsschweißen, Rotationsschweißen und Ultraschallschweißen miteinander verbunden werden.

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Schweißmethoden beschrieben und die Geräte und Bedingungen erläutert, die mit Amodel AS-1133 HS zufriedenstellende Schweißverbindungen erzeugt haben. Diese Bedingungen sind die vorgeschlagenen Anfangspunkte zur Bestimmung von Schweißbedingungen in der Praxis. Für andere Amodel-Typen müssen die angegebenen Prozessbedingungen möglicherweise angepasst werden. In bestimmten Fällen werden zusätzliche Angaben gemacht, wie etwa zur Empfindlichkeit gegenüber Schweißbedingungen, Probekörpergeometrie oder Feuchtigkeitsgehalt.

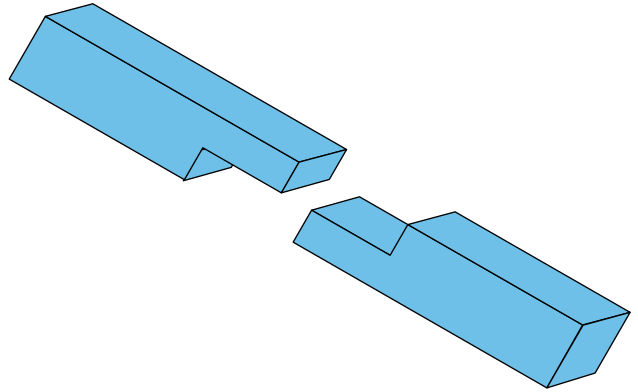
Da Amodel-Polymere Feuchtigkeit aufnehmen, wurden Tests an Probekörpern mit drei verschiedenen Feuchtigkeitsgraden durchgeführt: 0 %, 1,8 % und 3,8 % Feuchtigkeit. Diese Werte wurden ausgewählt, da sie den Feuchtigkeitsgraden für Formteile aus Amodel AS-1133 HS entsprechen, die bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von jeweils 0 %, 50 % und 100 % den Gleichgewichtszustand in Luft erreicht haben. Um die Analyse der Ergebnisse zu vereinfachen, wird für spritzfrische Probekörper der Begriff „trocken“, für Probekörper mit 1,8 % Feuchtigkeit der Begriff „normal“ und für Probekörper mit 3,8 % Feuchtigkeit der Begriff „gesättigt“ verwendet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit allen in diesem Abschnitt beurteilten und beschriebenen Schweißverfahren zufriedenstellende Schweißverbindungen erzielt werden können. Beim Ultraschallschweißen ist für stabile Schweißnähte eine Intensivbeschallung im Nahfeld notwendig. Normalerweise wird der Schweißvorgang nicht durch aufgenommene Feuchtigkeit beeinträchtigt, die besten Ergebnisse werden jedoch bei Verwendung von Probekörpern mit normalem Feuchtigkeitsgehalt (1,8 %) oder weniger erzielt.

### Heizelementschweißen

Beim Heizelementschweißen werden die Thermoplast-Probekörper gegen ein Heizelement gepresst, so dass die Kontaktfläche schmilzt. Anschließend wird das Element entfernt und die Probekörper werden unter Druck zusammengefügt. Diese Schweißmethode erfordert normalerweise längere Zykluszeiten als andere Verfahren, ermöglicht jedoch die Verbindung von Teilen mit einer viel größeren Oberfläche. Bei sorgfältiger Ausführung kann mithilfe dieser Methode eine feste und hermetische Verbindung mit Amodel-Polymeren erzeugt werden.

**Abbildung 88: Fügestellen beim Heizelementschweißen**



Das verwendete Heizelement-Schweißgerät war ein Schweißgerät des Typs Bielomatic HV 4806, das 1986 von Leuze GmbH hergestellt wurde. Bei den verwendeten Probekörpern handelte es sich um Stäbe mit 102 mm Länge x 25 mm Breite x 6 mm Dicke. Das Schweißgerät war für eine Überlappungsverbindung von 13 mm x 25 mm eingerichtet. Abbildung 88 zeigt eine schematische Darstellung der Schweißverbindungen.

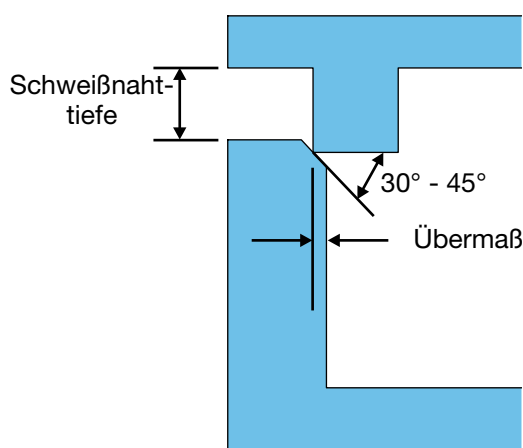
Die besten Ergebnisse wurden mit einer Heizelementtemperatur von 330 °C und einem Pressdruck von 207 KPa erzielt. Als optimale Heizzeit für die Probekörper ergab sich 40 Sekunden mit einer Nachdruckzeit von 20 Sekunden. Die Festigkeit der hergestellten Verbindung war vergleichbar mit der Festigkeit des Werkstoffes selbst, d. h., die meisten Probekörper versagten bei der mechanischen Prüfung an einer anderen Stelle als an der Verbindungsstelle.

Gelegentlich blieben die Probeplatten am Heizelement kleben, es sei denn, es wurde ein Silikon-Formtrennmittel verwendet und das Heizelement konnte das thermische Gleichgewicht erreichen. Die Versuche haben ergeben, dass die Schweißfestigkeit durch die Verwendung des Formtrennmittels nicht beeinträchtigt wurde. Bei trockenen (0 %) und normalen (1,8 %) Probekörpern hatte die aufgenommene Feuchtigkeit keine wesentlichen Auswirkungen auf die Schweißfestigkeit, im gesättigten (3,8 %) Zustand wurde die Schweißfestigkeit jedoch reduziert.

### Vibrationsschweißen

Beim Vibrationsschweißen wird durch Reibung an der Schweißverbindungsstelle Wärme erzeugt. Eines der zu verbindenden Teile wird fixiert und das Gegenstück vibriert linear mit 100 Hz bis 400 Hz um ca. 0,8 mm bis 1,5 mm. Vibrationsschweißen ist auf flache Teile beschränkt, hat jedoch eine relativ kurze Zykluszeit und geringe Werkzeugkosten.

**Abbildung 89: Konfiguration einer Überlappungsverbindung**



Das für diese Versuche verwendete Gerät war ein Vinton Hydroweld-Vibrationsschweißgerät. Dieses Gerät schweißt bei einer Nennfrequenz von 240 Hz. Es wurden Probekörper mit 102 mm Länge x 25 mm Breite x 6 mm Dicke verwendet, die in einer Überlappungskonfiguration von 25 x 13 mm (siehe Abbildung 89) verschweißt wurden.

Diese Methode war sehr effektiv. Es konnten ohne Weiteres Schweißverbindungen mit der gleichen Festigkeit wie der Grundwerkstoff erzielt werden. Dieses Verfahren erwies sich als relativ unempfindlich gegenüber den Schweißbedingungen und lieferte bei einer Schweißzeit von nur 0,6 Sekunden und einem Druck von nur 2,20 MPa gute Ergebnisse. Die besten Ergebnisse wurden mit Probekörpern mit normalem Feuchtigkeitsgehalt (1,8 %) erreicht.

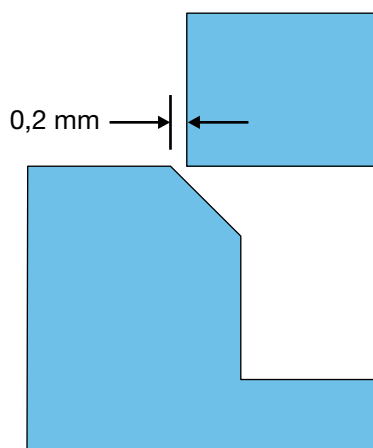
### Rotationsschweißen

Beim Rotationsschweißen werden zwei zylindrische oder kugelförmige Fügeteile durch Reibungswärme verbunden. Ein Fügeteil wird in einer verdrehsicheren Halterung fixiert, während das andere Fügeteil eine rotierende Bewegung mit hoher Drehzahl dagegen ausführt. Durch die Grenzflächenreibung erhöht sich die Temperatur des Werkstoffes, bis er schmilzt. Nach dem Anhalten der Drehbewegung werden die Teile aneinander gepresst, bis sie abgekühlt sind. Diese Schweißmethode ist offensichtlich auf Teile mit kreisförmiger Geometrie an der Verbindungsstelle beschränkt. Der Vorteil beim Rotationsschweißen ist die gegenüber anderen Verfahren erhöhte Verteilung des Materials an der Verbindungsstelle. Dadurch können hermetische Abdichtungen entstehen und die Toleranzanforderungen an die Verbindungsgeometrie verringern sich.

Rotationsgeschweißte Verbindungen mit Amodel-PPA sollten als Scherverbindungen (siehe Abbildung 90) ausgeführt werden. Die Ausführung kann Gratfallen enthalten, um je nach den Anforderungen den örtlich begrenzten Materialfluss zu einer Seite des Teils zu leiten.

Das für diese Versuche verwendete Rotationsschweißgerät war ein Gerät des Typs Mechasonic KLN Omega, Modell SPN-063. Die wichtigsten Parameter bei dieser

**Abbildung 90: Konfiguration einer Scherverbindung**



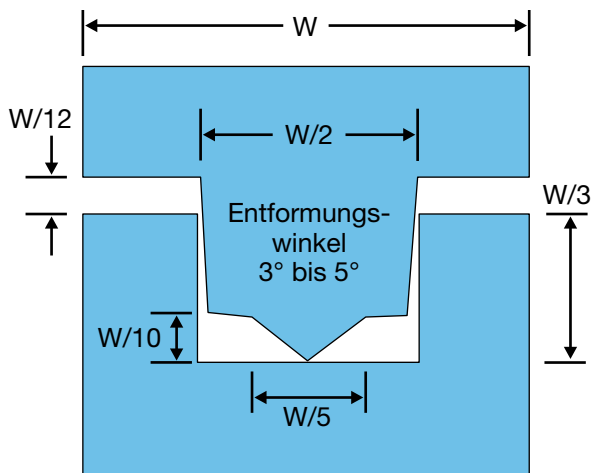
Schweißmethode sind normalerweise die Winkelgeschwindigkeit in Umdrehungen pro Minute, die Normalkraft und die Schweißzeit. Da es sich bei dem verwendeten Gerät um ein Trägheitsgerät handelte, war die zum Rotieren des Probekörpers verfügbare Energie auf die im Schwungrad gespeicherte Energie beschränkt. Anstatt die Drehzahl direkt zu verstellen, wurde die im Schwungrad gespeicherte Energie geregelt. Bei moderneren Rotationsschweißgeräten können die Drehzahl, die Kraft, die Zeit und in manchen Fällen sogar die Winkelstellung geregelt werden.

Bei den für den Rotationsschweißversuch verwendeten Probekörpern handelte es sich um spritzgegossene Becher mit einer Übermaßverbindung. Mit dieser Methode wurde eine ausgezeichnete Schweißfestigkeit erzielt.

Da die Schweißbedingungen maschinenspezifisch waren, sind sie als Anfangspunkt nicht allgemein brauchbar. Es wurde jedoch beobachtet, dass mit steigendem Pressdruck und mit zunehmender Winkelgeschwindigkeit die Schweißfestigkeit bis zu einem Höchstwert zunahm. Wurde dagegen entweder der Druck oder die Drehzahl übermäßig erhöht, nahm die Schweißfestigkeit ab. Die Werte für diese Parameter hängen stark von der Teilegeometrie ab und werden hier deshalb nicht angegeben. Das beobachtete Phänomen lässt sich folgendermaßen erklären: Wenn eine Schweißverbindung mit zu hohem Pressdruck erzeugt wurde, wurde die Rotationsbewegung zu plötzlich angehalten und es konnte nicht genug Polymer für die Bildung einer festen Verbindung geschmolzen werden. Bei dem anderen Extrem, d. h. bei einer hohen Winkelgeschwindigkeit und einem geringen Pressdruck, drehte das obere Teil im Prinzip frei auf dem unteren Teil, ohne in die Übermaßpassung gepresst zu werden. Für eine gute Verbindung müssen daher Schweißbedingungen ermittelt werden, bei denen sowohl ein Schmelzen als auch ein Einpressen stattfindet.

Der Feuchtigkeitsgehalt hatte keine wesentliche Auswirkung auf die Schweißfestigkeit.

**Abbildung 91: Typische energierichtende  
Verbindungskonfiguration**



## Ultraschallschweißen

Beim Ultraschallschweißen von Thermoplasten werden hochfrequente (10 bis 40 kHz) mechanische Schwingungen durch eines der Fügeteile zur Grenzfläche der Verbindung übertragen, während die andere Hälfte der Baugruppe fixiert ist. Die Kombination von Reibung und einer aufgetragenen Kraft führt dazu, dass die Temperatur an der Verbindungsgrenzfläche bis auf die Schmelztemperatur des Werkstoffes ansteigt. Die Normalkraft wird nach dem Entfernen der Ultraschallenergiezufuhr gehalten, um eine mechanische Bindung oder Verschweißung zu erzielen.

Ultraschallschweißen hat den Vorteil, dass es eine sehr schnelle Technik ist und sich gut für die Großserienproduktion eignet. Die Gleichförmigkeit und Qualität der Schweißverbindungen sind bei diesem Verfahren sehr hoch – bei Teilen mit hoher Maßgenauigkeit können sogar hermetische Abdichtungen erzeugt werden.

Neben dem Ultraschallschweißgerät wird für jede Baugruppe ein speziell angefertigtes Schweißhorn benötigt, um die Ultraschallenergie für die jeweilige Teilekonfiguration zu fokussieren.

Für die Verwendung mit Amodel-Werkstoffen wird eine energierichtende Verbindungsstruktur empfohlen, damit das Polymer an der Verbindungsstelle örtlich begrenzt aufschmilzt. Eine typische Verbindungsausführung ist in Abbildung 91 dargestellt. Das empfohlene Übermaß bei einer Scherverbindung beträgt mindestens 0,2 mm.

Das für diese Versuche verwendete Ultraschallschweißgerät war ein mikroprozessorgesteuertes Gerät vom Typ Branson Model 910 M. Bei diesem Gerät kann die Menge der am Probekörper aufgetragenen Ultraschallenergie verstellt werden. Für den Test wurde die abgegebene Leistung des Verstärkers zu Nah- und Fernfeldhörner geführt. Die verwendeten Proben waren dem spritzgegossenen Becher ähnlich, der für die Beurteilung des Rotationsschweißens verwendet wurde. Die Teile

wurden mit Aluminiumhalterungen fixiert und es wurde eine Stumpfschweißverbindung gebildet.

Die Schweißverbindungen, die mit einem Nahfeldhorn (definiert als 6 mm oder weniger, gemessen vom Horn zur Schweißverbindung) erzeugt wurden, waren ausgezeichnet. Schweißverbindungen, die mit einem Fernfeld-Horn erzeugt wurden, waren schwach (ein Drittel der Nahfeld-Festigkeit) und sind wahrscheinlich nicht brauchbar. Die folgenden Bedingungen ergaben eine zufriedenstellende Schweißfestigkeit: Schweißenergie von 750 J und Druck von 4,3 MPa.

## Kleben

Spritzgegossene Probekörper aus Amodel A-1133 HS wurden mit einem Epoxid- und einem Urethanklebstoff verklebt. Beide Klebstoffe wurden von der Lord Corporation bezogen. Bei dem Epoxidkleber handelte es sich um einen Zweikomponenten-Klebstoff, der unter dem Handelsnamen Lord® 305-1/305-2 vertrieben wird. Der Urethankleber war ein Zweikomponenten-Klebstoff, der als Lord® 7500 A/C bekannt ist.

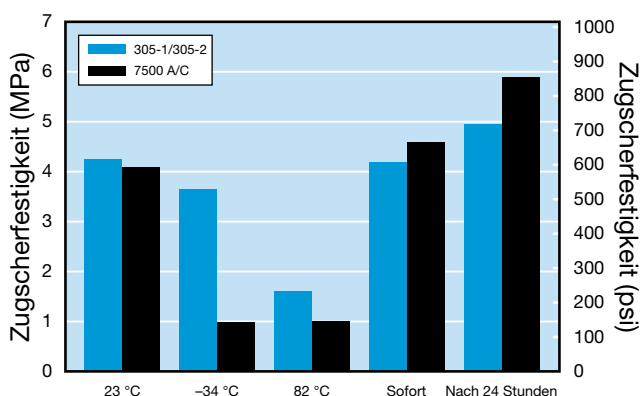
Als Vorbereitung auf den Lord® 305-1/305-2-Klebstoff wurden die Probekörper einem Aushärtezyklus von 30 Minuten bei 120 °C unterzogen, gefolgt von einer Konditionierung für 72 Stunden bei Raumtemperatur. Der Aushärtezyklus für den Lord® 7500 A/C-Klebstoff betrug 10 Minuten bei 90 °C, gefolgt von einer Konditionierung für 72 Stunden bei Raumtemperatur.

Die Klebefestigkeit beider Materialien wurde bei tiefer Temperatur, Raumtemperatur und hoher Temperatur gemessen. Um die Auswirkung der Feuchtigkeitssalterung zu beurteilen, wurden die Probekörper 14 Tage lang bei 38 °C und 100 % relativer Luftfeuchtigkeit konditioniert. Einige Probekörper wurden unmittelbar nach der Konditionierung geprüft, andere 24 Stunden nach der Konditionierung.

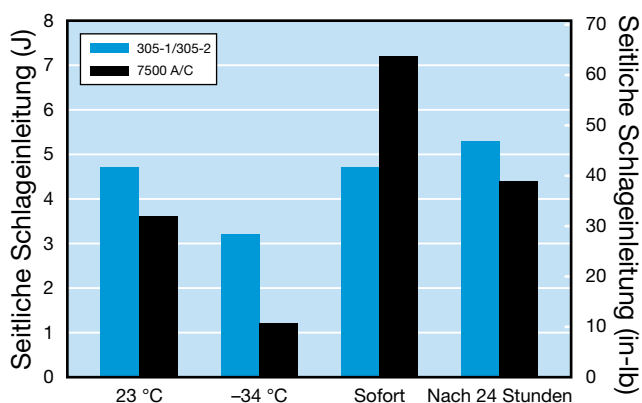
Die Schlagfestigkeit wurde mit einer Vorrichtung für die seitliche Schlagprüfung gemäß GM-Spezifikation #9751P bestimmt. Die Zugscherwerte wurden auf einer Instron-Prüfmaschine mit einer Zuggeschwindigkeit von 13 mm/min gemäß ASTM D1002 gemessen.

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 92 und 93 dargestellt. Der Epoxidkleber lieferte etwas bessere Ergebnisse als der Urethankleber. Acrylkleber werden für die Verwendung mit Amodel-Polymeren nicht empfohlen.

**Abbildung 92: Zugscherfestigkeit der Klebeverbindung**



**Abbildung 93: Schlagzähigkeit der Klebeverbindung (seitlich)**



**Tabelle 49: Geeignete Kfz-Grundierungen**

Anbieter	Grundierung	Beschreibung
BASF	U04KD004	Lösungsmittel, elastisch
	U04AD041	Lösungsmittel, starr
	U36AD001	Wasserbasis
PPG	RPP9870	Lösungsmittel, hoher Feststoffanteil
	AHAP9470R	Lösungsmittel, eine Schicht
Red Spot	AE146	Lösungsmittel, Lack
Siebert-Oxidermo	UBP9604	Lösungsmittel, hoher Feststoffanteil
	BP2024	Lösungsmittel
Sherwin-Williams	E75BC2301	Lösungsmittel
	E75AC6	Lösungsmittel

## Beschichtungen und Oberflächenbehandlungen

### Vakuumbedampfen

Beim Vakuumbedampfen wird ein Metall in einer Vakuumkammer verdampft und anschließend auf einem Trägerwerkstoff kondensiert. Das für die meisten Industrieanwendungen verwendete Metall ist Aluminium. Wenn die Beschichtung vorwiegend dekorativ sein soll, wird der Trägerwerkstoff normalerweise mit zwei organischen Beschichtungen bearbeitet – der Grundierung und der Deckschicht – zwischen denen sich die Metallschicht befindet. Die Hauptaufgabe der Grundierung ist die Bildung einer glatten Oberfläche auf den geformten Kunststoffteilen, damit die Metallschicht so stark wie möglich glänzt. Die Sekundärfunktion der Grundierung besteht darin, eine optimale Haftung der Metallschicht auf dem Trägerwerkstoff zu ermöglichen. Bei Trägerwerkstoffen, die im Vakuum zum Ausgasen neigen, dient die Grundierung außerdem als Barrierschicht. Die Aufgabe der Deckschicht besteht darin, die Metallschicht vor physikalischem, oxidativem oder chemischem Abbau zu schützen.

Mit Amodel-Polymeren kompatible Grundierungen sind zum Beispiel #VB-4315, #VB-4774 und #VB-4836-1 von Pearl Paints (<http://www.pearlpaints.com>). Eine mit Amodel-Polymeren kompatible Deckschicht ist beispielsweise #VT 4316-2 (ebenfalls von Pearl Paints).

Da die Metalle während dieses Verfahrens verdampft werden müssen, muss mit einer erhöhten Temperatur in der Vakuumkammer gerechnet werden. Die Geschwindigkeit, mit der Teile beschichtet werden können, hängt von den thermischen Eigenschaften des Trägerwerkstoffes ab. Aus diesem Grund eignet sich Amodel mit seiner hohen Wärmeformbeständigkeit hervorragend für die Bedampfung mit Metall, da vergleichsweise kurze Zykluszeiten möglich sind.

**Tabelle 50: Anbieter von Laserbeschriftungsgeräten**

Firma	Website
Videojet Systems International, Inc.	<a href="http://www.videojet.com">www.videojet.com</a>
Panasonic Electric Works Corporation	<a href="http://www.panasonic-electric-works.co.uk">www.panasonic-electric-works.co.uk</a>
ID Technology	<a href="http://www.idtechnology.com">www.idtechnology.com</a>

**Tabelle 51: Anbieter von Tintenstrahl-Druckgeräten**

Firma	Website
Videojet Systems International, Inc.	www.videojet.com
ID Technology	www.idtechnology.com

## Laserbeschriften

Auf Amodel-Polymeren kann mit handelsüblichen Laserbeschriftungsgeräten eine haltbare, kontrastreiche Beschriftung aufgebracht werden. Je nach Wellenlänge und Intensität des verwendeten Lasersystems liegt das Erscheinungsbild der Beschriftung im Bereich zwischen einer gebleichten Oberfläche und einer eingravierten Beschriftung.

Für das Laserbeschriften von Amodel-PPA-Polymeren können keine speziellen Bedingungen angegeben werden. Die Betriebsparameter müssen entsprechend der Anwendung und gemäß dem zu beschriftenden Teil angepasst werden.

Die in Tabelle 50 aufgeführten Hersteller bieten Geräte an, die zum Beschriften von Amodel-PPA geeignet sind.

## Tintenstrahldruck

Mit dem Tintenstrahldruckverfahren kann auf Amodel-PPA-Trägerwerkstoffen jeder Farbe eine sehr gut sichtbare Beschriftung aufgebracht werden. Die Haltbarkeit der mit einem Tintenstrahldruckgerät aufgetragenen Beschriftung hängt von der Einsatzumgebung des beschrifteten Teils sowie von der für die Beschriftung verwendeten Tinte ab. In vielen Fällen ist die Haltbarkeit der Beschriftung zufriedenstellend.

Die Geräteanforderungen hängen von der Art der verwendeten Tinte, der Druckgeschwindigkeit und der Größe der gewünschten Beschriftung ab. Es sind zahlreiche verschiedene Geräte und Tinten im Handel erhältlich. Zwei Bezugsquellen sind in Tabelle 51 aufgeführt.

## Lackieren

Mehrere Amodel-PPA-Typen wurden hinsichtlich ihrer Kompatibilität mit verschiedenen Kfz-Lacken beurteilt. Es wurden repräsentative glasfaser-, mineral- und mineral-/glasfaserverstärkte Compounds geprüft.

Wie bei allen Kunststoff-Trägermaterialien ist die Wahl der Grundierung entscheidend. Die Probekörper wurden mit Isopropylalkohol gereinigt, mit Grundierungen beschichtet und gemäß den Anweisungen des Herstellers ausgehärtet. Die Platten wurden im frisch beschichteten Zustand und nach 96 Stunden Konditionierung mit Wasser/Nebel/Feuchtigkeit gemäß GM4465P folgenden Prüfungen unterzogen: Klebehaftung (GM9071P, Methode A), Gitterschnitthaftung (GM9071P, Methode B) und Gravelometer-Splitterfestigkeit (GM9508P und SAEJ400). In Tabelle 49 sind die Grundierungen aufgeführt, die alle Testanforderungen erfüllen oder sogar übertreffen sowie für die meisten Kfz-Lackierungsanwendungen ein zufriedenstellendes Beschichtungsverhalten aufweisen.

## Umspritzen

Ein von der Bryant Rubber Corporation entwickeltes Verfahren ermöglicht das Umspritzen von Amodel-Werkstoffen mit weichem Silikonkautschuk. Die Silikonkautschuk-Werkstoffe eignen sich ideal zum Herstellen von Dichtungsflächen, angenehm anfühlenden Griffen und geräusch-/lärmdämpfenden Details. Auch wenn das Umspritzen mit Silikonkautschuk keine neue Erfindung ist, haften diese Konstruktionsdetails normalerweise schlecht an den starren Trägerwerkstoffen, selbst wenn Grundierungen oder Grundierungsverfahren eingesetzt werden. Die mit der SPAPS™-Technik (Select Primerless Adhesion Polymer System) von Bryant erzielte Haftung und Abschälfestigkeit ist wesentlich besser als alles bisher Erreichte. Der Kohäsionsbruch des Silikonkautschuks ist sogar ein wesentlicher Bestandteil der SPAPS™-Technik.

Amodel-Polymere eignen sich dank ihrer hervorragenden Eigenschaften bei hohen Temperaturen besonders gut für die Verwendung mit SPAPS™-Silikonkautschuken. Sie ermöglichen kürzere Zykluszeiten für den Silikonaushärtungsprozess, wodurch das Preis-/Leistungsverhältnis verbessert wird. Die Silikonwerkstoffe haben eine dem Amodel-Polymer entsprechende thermische Langzeitstabilität, so dass eine lange Lebensdauer in anspruchsvollen Umgebungen gewährleistet ist.

Die SPAPS™-Silikonkautschuke werden mit dem gleichen Spektrum an Materialeigenschaften angeboten wie andere gängige Silikonkautschuke. Die Werkstoffe sind naturtransparent und können während der Verarbeitung mit Flüssigfarben eingefärbt werden. Dabei wird selbst bei einer Langzeiteinwirkung von UV-Licht eine hervorragende Farbechtheit erzielt. Sie sind mit Shore A-Härten von 10 bis 85 erhältlich. Ihre Chemikalienbeständigkeit ist vergleichbar mit der anderer Silikonkautschukwerkstoffe. Da diese Materialien unreaktiv sind, ist eine behördliche Zulassung der fertigen Teile durch z. B. die NSF, FDA und USP möglich.

Weitere Angaben zum Umspritzverfahren sind von der Bryant Rubber Corporation unter <http://www.bryantrubber.com/> erhältlich.





## A

Amodel-Polymer – Tabellen mit typischen Eigenschaften . . . . .	4
Amodel-Polyphthalamid (PPA) . . . . .	1
Änderung der Wanddicke . . . . .	68
Anwendung klassischer Spannungs-Dehnungs-Formeln . . . . .	67
Anzugsmoment . . . . .	75
Aufnahmemenge . . . . .	39
Auswirkungen von Feuchtigkeit . . . . .	3
Auswirkungen von Feuchtigkeit . . . . .	38
Auswirkung von Feuchtigkeit auf Festigkeit und Steifigkeit . . . . .	39

## B

Bedeutung der Feuchtigkeitsaufnahme . . . . .	38
Berechnung der Ausreißkraft . . . . .	75
Berechnung der Durchbiegung . . . . .	69
Berechnung der zulässigen Spannung – Kriechbruch . . . . .	70
Berechnung des zulässigen Übermaßes . . . . .	73
Berechnung für Dauerbelastung . . . . .	69
Berücksichtigung der Verstärkungsfaserorientierung . . . . .	67
Berücksichtigung von Spannungskonzentrationen . . . . .	71
Berücksichtigung von thermischen Spannungen . . . . .	71
Beschichtungen und Oberflächenbehandlungen . . . . .	84
Beschleunigte Feuchtigkeitsaufnahme . . . . .	6
Beständigkeit gegen Umgebungseinflüsse . . . . .	58
Biegeeigenschaften . . . . .	23
Biegeeigenschaften bei hohen Temperaturen . . . . .	24
Biege-Kriechverhalten . . . . .	35
Blechsrauben . . . . .	74
Brandeigenschaften . . . . .	50

## C

Charpy-Schlagzähigkeit (gelagerter Balken) . . . . .	29
Chemie . . . . .	1
Chemikalienbeständigkeit . . . . .	58
Chemikalienverträglichkeit . . . . .	62
Comparative Tracking Index (CTI) (ASTM D3638) . . . . .	55

## D

Dielektrische Durchschlagspannung und Durchschlagfestigkeit – ASTM D149 . . . . .	53
Dielektrischer Verlustfaktor (ASTM D150) . . . . .	54
Dielektrizitätskonstante (ASTM D150) . . . . .	54
Dimensionsänderung aufgrund von Feuchtigkeitsaufnahme . . . . .	40
Dimensionsänderung im Vergleich zu PA 6,6 . . . . .	41
Druckfestigkeit und Druckmodul . . . . .	27
Druck-Kriechverhalten . . . . .	36
Dry Arc Resistance (ASTM D495) . . . . .	55
Durchbiegungsberechnungen . . . . .	67

## E

Eigenschaften . . . . .	6
Eigenschaften von Amodel-Polymeren nach UL 746A . . . . .	57
Einleitung . . . . .	1
Elektrische Eigenschaften . . . . .	53
Entformungswinkel . . . . .	78
Ermüdungsfestigkeit . . . . .	36
Ermüdungsfestigkeit von Amodel-Polymeren . . . . .	37

## F

Falltest-Stoßverhalten . . . . .	30
Feuchtigkeitsaufnahme und Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) . . . . .	38
Formel für einen verjüngten, einseitig eingespannten Balken . . . . .	77

## G

Gammastrahlung . . . . .	62
Gewindeeinsätze . . . . .	75
Glühdrahttest . . . . .	50
Grenzen der Konstruktionsberechnungen . . . . .	67

## H

Heizelementschweißen . . . . .	81
High Current Arc Ignition (HAI) . . . . .	56
High-Voltage Arc Resistance to Ignition . . . . .	56
High Voltage Arc Tracking Rate (HVTR) . . . . .	55
Hinterschneidungen . . . . .	80
Horizontaler Flammtest . . . . .	51
Hot Wire Ignition (HWI) (ASTM D3874) . . . . .	56

## I

Isochrone Spannungs-Dehnungs-Diagramme . . . . .	34
Izod-Schlagzähigkeit (einseitig eingespannter Balken) . . . . .	28

## K

Kleben . . . . .	83
Konstruktion für die Montage . . . . .	73
Konstruktion mit Schnappverbindungen . . . . .	76
Konstruktionsinformationen . . . . .	63
Konstruktion von Teilen mit gleicher Steifigkeit . . . . .	68
Kriechbruch unter Zugbelastung . . . . .	34
Kriechverhalten . . . . .	31
Kristallinität . . . . .	2

## L

Lackieren . . . . .	85
Laserbeschriften . . . . .	85
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient (CLTE) . . . . .	43



## M

Mechanische Eigenschaften . . . . .	19
Mechanische Konstruktionsfaktoren . . . . .	64
Mechanische Kurzzeiteigenschaften . . . . .	19
Mechanische Langzeiteigenschaften . . . . .	31
Mechanische Verbindungselemente . . . . .	74

## N

Nachbearbeitung . . . . .	81
Nocken . . . . .	79
Nomenklatur . . . . .	5

## O

Oberflächenwiderstand (ASTM D257) . . . . .	53
---	----

## P

Presspassungen . . . . .	73
Produktauswahl . . . . .	5
Produktdaten . . . . .	4
Prüfmethoden . . . . .	19
Prüfmethoden . . . . .	23

## Q

Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl) . . . . .	30
---	----

## R

Rauchdichtetest (NBS) . . . . .	51
Relativer Temperaturindex (UL) . . . . .	48
Relative Temperaturindizes nach UL . . . . .	57
Rippen . . . . .	79
Rotationsschweißen . . . . .	82

## S

Scherverhalten . . . . .	26
Schlagzähigkeit . . . . .	27
Schweißen . . . . .	81
Spannungsberechnungen . . . . .	67
Spezifischer Durchgangswiderstand (ASTM D257) . . . . .	53
Spezifische Wärme . . . . .	46
Spritzgussgerechte Konstruktion . . . . .	78

## T

Thermische Eigenschaften . . . . .	42
Thermische Stabilität . . . . .	47
Thermogravimetrische Analyse (TGA) . . . . .	47
Tintenstrahldruck . . . . .	85
Typische Eigenschaften . . . . .	6

## U

UL 746A: Elektrische Kurzzeiteigenschaften . . . . .	54
Ultraschallschweißen . . . . .	83
Umspritzen . . . . .	85
Umspritzte Gewinde . . . . .	76

## V

Vakuumbedampfen . . . . .	84
Verbesserung der Anzugsmoment-Beibehaltung . . . . .	74
Vergleich der Izod-Schlagzähigkeit . . . . .	28
Vergleich von Biegeeigenschaften . . . . .	24
Vergleich von Zugeigenschaften . . . . .	21
Verlust der Schraubverbindungsfestigkeit durch Kriechen . . . . .	72
Vertikale Entflammbarkeit nach UL 94 . . . . .	51
Vertikaler 50-W-Flammtest (20 mm) . . . . .	51
Vertikaler Flammtest (500 W) . . . . .	52
Verwendung von Kernen . . . . .	79
Verwendung von Rippen zur Beibehaltung der Steifigkeit . . . . .	68
Vibrationsschweißen . . . . .	81

## W

Wanddicke . . . . .	78
Wanddickenänderung . . . . .	78
Wärmealterung . . . . .	47
Wärmeformbeständigkeit (HDT) . . . . .	42
Wärmeformbeständigkeitswerte von Amodel-Polymeren . . . . .	43
Wärmeleitfähigkeit . . . . .	45

## Z

Zugeigenschaften . . . . .	19
Zugeigenschaften von GF-A-1000-Typen bei hohen Temperaturen . . . . .	22
Zugeigenschaften von GF-PPA in Abhängigkeit von der Temperatur . . . . .	21
Zug-Kriechverhalten . . . . .	32





## Specialty Polymers

### Hauptverwaltung

**SpecialtyPolymers.EMEA@solvay.com**

Viale Lombardia, 20  
20021 Bollate (MI), Italy

### Regionalverwaltung Amerika

**SpecialtyPolymers.Americas@solvay.com**

4500 McGinnis Ferry Road  
Alpharetta, GA 30005, USA

### Regionalverwaltung Asien

**SpecialtyPolymers.Asia@solvay.com**

No.3966 Jindu Road  
Shanghai, China 201108

[www.solvay.com](http://www.solvay.com)

Sicherheitsdatenblätter (SDS) sind per E-Mail oder von dem für Sie zuständigen Ansprechpartner erhältlich. Vor der Verwendung eines unserer Produkte muss immer das entsprechende Sicherheitsdatenblatt zu Rate gezogen werden.

Weder Solvay Specialty Polymers noch ein mit ihr verbundenes Unternehmen gibt irgendeine Gewährleistung, ausdrücklich oder konkludent, insbesondere hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit oder Geeignetheit für eine bestimmte Verwendung, oder akzeptiert irgendeine Haftung im Zusammenhang mit diesem Produkt, Informationen, die dieses Produkt betreffen oder seiner Verwendung. Einige Verwendungsarten, für die Solvay-Produkte eingesetzt werden könnten, sind in ihrer Anwendung durch geltende Gesetze und Vorschriften oder durch nationale bzw. internationale Normen und in einigen Fällen durch Empfehlungen von Solvay reguliert bzw. eingeschränkt. Dazu gehören Anwendungen in den Bereichen Lebens- bzw. Futtermittel, Trinkwasseraufbereitung, Medizinprodukte, Pharmazeutika und Körperpflege. Ausschließlich Produkte, die zur Solviva®-Biomaterialfamilie gehören, können u. U. als Werkstoffe für implantierbare Medizinprodukte verwendet werden. Es obliegt dem Käufer in seiner alleinigen Verantwortung zu überprüfen, ob eine Information oder Produkte für den von ihm angestrebten Verwendungszweck unter Einhaltung der geltenden Gesetze geeignet sind und ob Patente verletzt werden, sowie die Verwendungsweise festzulegen. Diese Information und die Produkte sind für die Verwendung durch technisch ausgebildete Personen nach deren freiem Ermessen und auf deren Risiko bestimmt und bezieht sich nicht auf die Verwendung dieses Produktes in Verbindung mit anderen Substanzen oder anderen Prozessen. Dies ist keine Lizenz unter einem Patent oder einem anderen Eigentumsrecht.

Alle Marken und eingetragenen Marken sind Eigentum der Solvay Gruppe bzw. ihrer jeweiligen Inhaber.  
© 2014 Solvay Specialty Polymers USA, LLC. Alle Rechte vorbehalten. D 2002 | R 03/2014 | Version 4.7