

Volker Gießbach, Nadine Buschner

# Rapid Manufacturing

## #Polymerwerkstoffe

### Handbuch

Werkstoffkenngrößen  
zur Charakterisierung der Produkteigenschaften



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Terminologie und Definitionen</b> .....	<b>X</b>
<b>Kennzeichnung und Kurzzeichen der Polymerwerkstoffe</b> .....	<b>XIX</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Rapid Manufacturing</b> .....	<b>3</b>
2.1 Bedeutung und Leistungskriterien .....	3
2.2 Gruppierung der Rapid-Manufacturing-Verfahren .....	4
2.3 Anwendungsbereiche .....	6
<b>3 Polymerwerkstoffe</b> .....	<b>7</b>
3.1 Struktur-Eigenschafts-Beziehungen .....	8
3.2 Thermoplaste .....	11
3.2.1 Polyolefine .....	12
3.2.1.1 Polyethylen (PE) .....	12
3.2.1.2 Polypropylen (PP) .....	13
3.2.2 Styrolpolymerisate .....	14
3.2.2.1 Polystyrol (PS) .....	14
3.2.2.2 Styrol-Butadien-Copolymer (SB) .....	15
3.2.2.3 Styrol-Acrylnitril-Copolymer (SAN) .....	15
3.2.2.4 Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) .....	16
3.2.3 Polyvinylchlorid (PVC) .....	17
3.2.3.1 Weichmacherfreies Polyvinylchlorid (PVC-U) .....	17
3.2.3.2 Polyvinylchlorid mit Weichmachern (PVC-P) .....	18
3.2.4 Polymethylmethacrylat (PMMA) .....	19
3.2.5 Polyamide (PA) .....	20
3.2.6 Polyoxymethylen (POM) .....	22

3.2.7	Thermoplastische Polyester.....	24
3.2.7.1	Polycarbonate (PC, PC+ABS).....	24
3.2.7.2	Polyethylenterephthalat (PET).....	26
3.2.7.3	Polybutylenterephthalat (PBT).....	27
3.2.8	Polyether.....	28
3.2.8.1	Polyphenylenether (PPE).....	28
3.2.8.2	Polyetheretherketon (PEEK).....	29
3.2.9	Polyimide.....	30
3.2.9.1	Polyetherimid (PEI).....	30
3.2.9.2	Polyamidimid (PAI).....	31
3.2.10	Polysulfide und Polysulfone.....	32
3.2.10.1	Polyphenylensulfid (PPS).....	32
3.2.10.2	Polysulfone (PSU, PES).....	33
3.2.11	Liquid Crystal Polymers (LCP).....	34
3.2.12	Synthetische Naturstoffpolymere.....	36
3.2.12.1	Cellulose-Derivate (CA, CP, CAB).....	36
3.2.12.2	Polylactid (PLA).....	37
3.2.13	Polytetrafluorethylen (PTFE).....	38
3.3	Elastomere.....	39
3.3.1	Thermoplastische Elastomere.....	39
3.3.2	Vernetzte Elastomere (Gummi).....	42
3.3.2.1	R-Kautschuk-Elastomere.....	43
3.3.2.2	M-Kautschuk-Elastomere.....	44
3.3.2.3	O-Kautschuk-Elastomere.....	45
3.3.2.4	Q-Kautschuk-Elastomere.....	45
3.3.2.5	U-Kautschuk-Elastomere.....	45
3.4	Duroplaste.....	47
3.4.1	Phenoplaste (PF).....	47
3.4.2	Aminoplaste (MF, UF).....	48
3.4.3	Ungesättigte Polyesterharze (UP).....	49
3.4.4	Epoxidharze (EP).....	50
3.4.5	Polyurethanharze (PUR/PUH).....	51

3.5	Werkstoffe für die additiven Fertigungsverfahren.....	52
3.5.1	Stereolithographiewerkstoffe (SL).....	54
3.5.2	Lasersinterwerkstoffe (LS).....	60
3.5.3	3D-Druck-Werkstoffe (3DP).....	66
3.5.4	Extrusionsformwerkstoffe (EM).....	71
3.6	Werkstoffe für die subtraktiven Fertigungsverfahren.....	78
3.7	Werkstoffe für die formativen Fertigungsverfahren.....	79
3.7.1	Werkstoffe für das Spritzgießen (SG).....	79
3.7.2	Werkstoffe für das Thermoformen (TF).....	79
3.7.3	Werkstoffe für das Vakuumgießen (VG).....	81
3.8	Zusatzstoffe zur Verbesserung der Werkstoffeigenschaften.....	88
3.9	Post-Prozesse zur Verbesserung der Produkteigenschaften.....	90
<b>4</b>	<b>Werkstoffeigenschaften – Prüfverfahren – Werkstoffkennwerte.....</b>	<b>95</b>
4.1	Mechanische Eigenschaften.....	96
4.1.1	Zugspannungs-Dehnungs-Verhalten.....	96
4.1.2	Biegefestigkeit.....	108
4.1.3	Druckfestigkeit.....	108
4.1.4	Schlagfestigkeit und Kerbschlagfestigkeit.....	109
4.1.5	Werkstoffhärte.....	110
4.2	Thermische Eigenschaften.....	116
4.2.1	Thermomechanisches Belastungsverhalten.....	116
4.2.2	Formbeständigkeitstemperatur.....	120
4.2.3	Gebrauchstemperaturen.....	121
4.2.4	Thermische Längenausdehnung.....	126
4.2.5	Wärmeleitfähigkeit.....	127
4.3	Elektrische Eigenschaften.....	132
4.3.1	Elektrische Isolationseigenschaften.....	132
4.3.2	Elektrische Durchschlagfestigkeit.....	133
4.3.3	Dielektrische Eigenschaften.....	133

4.4	Weitere konstruktionsrelevante Eigenschaften .....	142
4.4.1	Dichte .....	142
4.4.2	Wasseraufnahme .....	145
4.4.3	Witterungsbeständigkeit.....	148
4.4.4	Chemikalienbeständigkeit .....	149
4.4.5	Brennbarkeit.....	152
4.4.6	Lichtdurchlässigkeit.....	156
4.4.7	Einfärbbarkeit.....	157
4.5	Werkstoffpreise.....	158
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>161</b>
	<b>Autoren.....</b>	<b>162</b>
	<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>163</b>
	Literaturnachweis .....	163
	Normen und Richtlinien .....	164
	Patente und Gebrauchsmuster .....	167
	Firmeninformationen.....	168

## Terminologie und Definitionen (nach Sachgebieten geordnet)

Begriff	Erklärung
<b>Rapid Technologien</b>	Zusammenfassende Bezeichnung aller Technologien zur sehr schnellen computergestützten Entwicklung und Fertigung von Produkten. Die Unterteilung der Rapid Technologien erfolgt nach vielfältigen technischen und organisatorischen Möglichkeiten, um ein bestimmtes Ziel sehr schnell zu erreichen.
<b>Rapid Manufacturing</b>	Fertigungsverfahren zur sehr schnellen, bedarfsgerechten und wirtschaftlichen Herstellung von Produkten. Mit der durchgängigen Nutzung von 3D-CAD-Geometriemodellen, Werkstoff-, Fertigungs- und Qualitätssicherungsdaten wird die technologische, organisatorische, personelle und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit des Fertigungsprozesses verbessert (Basis für Industrie 4.0).
<b>Rapid Prototyping</b>	Fertigungsverfahren zur sehr schnellen Herstellung von Modellen, Mustern, Prototypen und Vorserienteile zum Vorstellen, Prüfen und Erproben von neuen Produkten.
<b>Rapid Tooling</b>	Zusammenfassende Bezeichnung aller Verfahren zur sehr schnellen Herstellung von Vorrichtungen, Werkzeugen und Formen. Rapid Tooling ist die vorgelagerte Prozessstufe für die subtraktive bzw. formative Fertigung von Rapid-Prototyping- und Rapid-Manufacturing-Produkten.
<b>Rapid Product Development</b>	Begriff für die sehr schnelle Produktentwicklung durch Nutzung rechnergestützter Entwurfs-, Konstruktions-, Fertigungs-, Simulations-, Dokumentations- und Prüfprogramme.
<b>Rapid Management</b>	Begriff für spezifische Organisationsformen zur sehr schnellen Herstellung von Modellen, Mustern, Prototypen, Vorserien und marktfähigen Produkten in Einzelstücken oder Kleinserien.
<b>Rapid Testing</b>	Zusammenfassende Bezeichnung für Mess- und Prüftechniken zum sehr schnellen Nachweis der Qualität der verwendeten Werkstoffe, des Fertigungsprozessablaufes und der Produkteigenschaften.

Begriff	Erklärung
<b>Werkstoffe</b>	Werkstoffe sind Materialien, die in einem Produktionsprozess durch Formgebung, Formveränderung, Verbunde mit anderen Materialsystemen und Stoffeigenschaftsänderung zum Bestandteil des Produktes werden.
<b>Polymerwerkstoffe</b>	Polymerwerkstoffe sind Makromoleküle, die aus vielen sich wiederholenden monomeren Grundbausteinen bestehen. Die Art des molekularen chemischen Aufbaus und der physikalischen Struktur der Makromoleküle bestimmen die Eigenschaften der Polymerwerkstoffe. Sie werden in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere unterteilt.
<b>Thermoplaste</b>	Thermoplaste sind Polymerwerkstoffe, die nach Erwärmung plastisch verformbar sind und sich bei Abkühlung wieder verfestigen. Ihre molekularen Bausteine bilden lineare und verzweigte Ketten. Je nach Zusammensetzung und Ordnungszustand der Moleküle zueinander wird in amorphe, teilkristalline und mesomorphe Thermoplaste unterschieden.
<b>Duroplaste</b>	Duroplaste sind räumlich engmaschig vernetzte Polymerwerkstoffe. Die Vernetzung der Molekülstrukturen erfolgt nach der Formgebung der Produkte. Die Formgebung ist irreversibel, d. h., der Werkstoff ist danach nicht mehr schmelzbar und nur kurzzeitig bis unterhalb der Zersetzungstemperatur belastbar.
<b>Elastomere</b>	Elastomere sind Polymerwerkstoffe, die gummielastische Verformungseigenschaften besitzen. Sie sind formstabil und bei mechanischer Belastung gut verformbar. Nach der Entlastung nimmt der Werkstoff, unabhängig von seiner geometrischen Form, seine Ausgangsform wieder an. Nach dem molekularen, weitmaschigen Vernetzungsverband unterscheidet man vernetzte Elastomere (Gummi) und thermoplastische Elastomere.
<b>Vernetzte Elastomere</b>	Vernetzte Elastomere sind weitmaschig vernetzte Polymerwerkstoffe (Gummi). Aufgrund der weitmaschigen chemischen Bindungen zwischen den Molekülketten und der hohen Beweglichkeit der Molekülketten bei niedrigen Glasübergangstemperaturen sind die Elastomere in der Lage, große Verformungen reversibel aufzunehmen (Gummielastizität).

Begriff	Erklärung
<b>Thermoplastische Elastomere</b>	Thermoplastische Elastomere sind eine Polymerwerkstoffgruppe, die die gummielastischen Eigenschaften vernetzter Elastomere mit der thermoplastischen Verarbeitbarkeit verbindet. Sie sind aufgrund der reversiblen Vernetzungsstellen thermisch nicht so hoch belastbar wie vernetzte Elastomere.
<b>Homopolymere</b>	Homopolymere sind Polymerwerkstoffe, die aus artgleichen monomeren Grundbausteinen bestehen.
<b>Copolymere</b>	Copolymere sind Polymerwerkstoffe, die aus unterschiedlichen monomeren Grundbausteinen bestehen.
<b>Polymerblends</b>	Polymerblends sind Mischungen, die aus verschiedenen Polymerwerkstoffe bestehen.
<b>Werkstoffmerkmale</b>	Verbale Beschreibung der Werkstoffeigenschaften zur groben Entscheidungsfindung bei der Werkstoffvorauswahl.
<b>Werkstoffkenngößen</b>	Quantitativ bestimmbare Eigenschaften eines Werkstoffes.
<b>Werkstoffkennwerte</b>	Zahlenwert für eine bestimmbare Werkstoffeigenschaft mit der dazugehörigen Maßeinheit der Werkstoffkenngöße.
<b>Werkstoffprüfung</b>	Prüfverfahren zur Kennwertermittlung.
<b>Werkstoffdatenbanken</b>	Systeme zur elektronischen Werkstoffkennwertverwaltung. Sie können große Mengen an Kennwertdaten speichern und dem Nutzer benötigte Teilmengen in bedarfsgerechter Form bereitstellen. Voraussetzung: Der Nutzer hat zuvor ein klares Ziel für die benötigten Kenngößen definiert. Ebenso können mit komfortablen Datenbanken die chemischen Bezeichnungen, Handelsnamen, Hersteller und Lieferanten der Polymerwerkstoffe angezeigt werden.

## Kennzeichnung und Kurzzeichen der Polymerwerkstoffe

Entscheidend für die erfolgreiche Nutzung der Rapid-Manufacturing-Verfahren ist, wie schnell und sicher der Konstrukteur für die nutzbaren Technologien und den Verwendungszweck der Produkte den passenden Werkstoff finden kann. Dazu werden technologieübergreifende Werkstoffinformationen mit einem einheitlichen Bezugs- und Kennzeichnungssystem benötigt.

Allgemein ist es üblich, dass Polymerwerkstoffe nach der chemischen Zusammensetzung ihrer Basispolymere und Zusatzstoffe sowie ihren charakteristischen Werkstoffkennwerten identifiziert werden. Die notwendigen Grundlagen und Informationen sind in den folgenden Normen aufgeführt:

- **DIN EN ISO 1043**  
Kunststoffe – Kennbuchstaben und Kurzzeichen
- **DIN EN ISO 18064**  
Thermoplastische Elastomere – Nomenklatur und Kurzzeichen
- **DIN ISO 1629**  
Kautschuk und Latices – Einteilung und Kurzzeichen
- **ASTM D 1418**  
Standard Practice for Rubber and Rubber Latices – Nomenclature

Leider werden in diesen wie auch in weiteren nationalen und internationalen Normen für einige Polymerwerkstoffe unterschiedliche Aussagen zur Kennzeichnung gemacht. Außerdem erschweren die im kommerziellen Bereich vorherrschenden Handelsnamen eine eindeutige Identifizierung

von Werkstoffzusammensetzung und Werkstoffeigenschaften. Um diese unbefriedigende Situation zu verbessern, wird nachfolgend ein Kennzeichnungssystem für Polymerwerkstoffe, wie es z. B. bei Metallwerkstoffen schon üblich ist, vorgestellt. Es berücksichtigt weitestgehend die Syntax der oben genannten Normen und wird um die Kennzeichnung der Fertigungsverfahren sowie dominanter Werkstoffkenngrößen und -werte erweitert.

Zu den dominanten Kenngrößen zählen aus der Sicht des Konstrukteurs der Zug-E-Modul und die Shore-Härte. Beide Kenngrößen stehen in eindeutiger Beziehung zur Gebrauchsfähigkeit des Produktes und sind Voraussetzung für eine funktionssichernde Gestaltung. Der Zug-E-Modul dient zur Klassifizierung steifer Werkstoffe mit energieelastischen Eigenschaften und ist ein Maß für die ertragbare mechanische Belastung bei kleinen Verformungen. Die Shore-Härte ist eine wichtige Kenngröße zur Klassifizierung von Polymerwerkstoffen mit gummielastischen Eigenschaften. Sie ist ein Maß für den Widerstand gegen das Eindringen eines harten Körpers.

Die verfahrensübergreifende Kennzeichnung der Polymerwerkstoffe besitzt folgende Struktur:

Fertigungsverfahren	Chemische Bezeichnung	Quantitative Kennwerte	Zusatzstoff (Art und Form)	Besondere Merkmale
Tabelle I	Tabellen II bis IV	Tabellen V	Tabelle VI	Tabelle VII

Die Identifizierung der Werkstoffe erfolgt durch die in den Tabellen I bis VIII aufgeführten Kurzzeichen.

Tabelle I: Kurzzeichen für die Fertigungsverfahren

Kurzzeichen	Fertigungsverfahren
	<b>Additive Fertigung</b>
<b>SL</b>	<b>Stereolithographie</b>
<b>LS</b>	<b>Lasersintern</b>
<b>3DP</b> 3DP-P 3DP-PB 3DP-W	<b>3D-Drucken (allgemein)</b> Verfahrenstyp: Polymerdruck Verfahrenstyp: Pulverbettdruck Verfahrenstyp: Wachsdruck
<b>EM</b> EM-S EM-T EM-V	<b>Extrusionsformen (allgemein)</b> Verfahrenstyp: Thermoplastische Strangablage Verfahrenstyp: Thermoplastische Tropfenablage Verfahrenstyp: Auftrag vernetzender Polymermischungen
<b>X-AF</b>	<b>Nicht gelistetes additives Verfahren</b>

Kurzzeichen	Fertigungsverfahren
	<b>Subtraktive Fertigung</b>
<b>3D-CNC</b>	<b>3D-CNC-Fräsen / Drehen</b>
<b>2D-CNC</b> 2D-CNC-LSS 2D-CNC-WSS	<b>2D-CNC-Schneiden</b> Laserstrahlschneiden Wasserstrahlschneiden
<b>X-CNC</b>	<b>Nicht gelistetes subtraktives Verfahren</b>
	<b>Formative Fertigung</b>
<b>SG</b>	<b>Spritzgießen</b>
<b>VG</b>	<b>Vakuumgießen</b>
<b>TF</b>	<b>Thermoformen</b>
<b>X-FF</b>	<b>Nicht gelistetes Formgebungsverfahren</b>

# 1 Einleitung

Das Werkstoffspektrum für die Rapid-Manufacturing-Verfahren ist groß und wird ständig erweitert. Es reicht von den üblichen Serienwerkstoffen bis zu speziellen Modifikationen für einzelne Technologien und Anlagentypen. Aus diesem Grund bedarf es einer Strategie und Ordnung bei der Auswahl des Werkstoffes. In diesem Buch werden auf der Basis des chemischen Aufbaus und der physikalischen Struktur der Makromoleküle die Struktur-Eigenschafts-Beziehungen beschrieben sowie für die gebräuchlichsten Polymerwerkstoffe die typischen Werkstoffmerkmale dargestellt. Damit wird dem Konstrukteur die Werkstoffvorauswahl erleichtert.

Bevor der Konstrukteur an die Werkstoffauswahl geht, analysiert er die Gebrauchsanforderungen an das Produkt und die Leistungsanforderungen für einen wirtschaftlichen Fertigungsprozess. Dieser Vorgang erfolgt oft über mehrere Gestaltungsvarianten unter Beachtung der möglichen Fertigungsverfahren und der verfügbaren Werkstoffe.

Besonders in der Produktentwicklungs- und Erprobungsphase sucht der Konstrukteur nicht nur nach einem Werkstoff, der den Anforderungen an ein marktfähiges Produkt am besten entspricht. Er nutzt auch Alternativen, mit denen er schnell und mit geringem Aufwand die gestalterischen, geometrischen oder funktionellen Forderungen am neuen Produkt erfassen, testen und optimieren kann.

Abhängig von der zweckgebundenen Zielsetzung für den jeweiligen Anwendungsfall berücksichtigt der Konstrukteur unterschiedliche Aspekte zur schnellen und wirtschaftlichen Werkstoffwahl:

1. Er trennt zuerst die notwendigen Werkstoffeigenschaften von den vielen Wunscheigenschaften und sucht nach geeigneten Werkstoffen, die die Anforderungen an das Modell, das Muster oder den Prototyp erfüllen.
2. Er verzichtet für Konzeptmodelle und Gestaltungsmuster auf den Einsatz hochbelastbarer Werkstoffe, um schnell und wirtschaftlich die gestalterischen Merkmale testen zu können.
3. Er wählt teilweise für Funktions- und Erprobungsmuster weniger widerstandsfähige Werkstoffe aus, um bei Testbelastungen die Schwachstellen und Belastungsgrenzen am Produkt besser zu erkennen.
4. Er sucht für Prototypen nach geeigneten Ersatzwerkstoffen, um durch Simulation die Gebrauchstauglichkeit schnell und wirtschaftlich testen zu können.
5. Er hinterfragt den Einfluss der chemischen Zusammensetzung der Basispolymere und die Wirkung der Zusatzstoffe auf die Werkstoffeigenschaften.

6. Ihm ist bekannt, dass die Werkstoffeigenschaften auch vom Verfahren und den Fertigungsparametern abhängig sind.
7. Er weiß auch, dass speziell modifizierte Rapid-Manufacturing-Werkstoffe höherwertige Eigenschaften gegenüber den geplanten Serienwerkstoffen erreichen können.
8. Er berücksichtigt, dass die unter Norm- oder Simulationsbedingungen ermittelten Werkstoffkennwerte nicht 1:1 auf das Produkt übertragbar sind und selten am marktfähigen Produkt eindeutig nachgewiesen werden können.
9. Er verwendet zur Dimensionierung der Produktgeometrie und zur Berechnung der zulässigen Belastbarkeiten immer die nachweislich sichersten Werkstoffkennwerte.
10. Ihm ist bekannt, dass mitunter die Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften bei der Werkstoffwahl keine entscheidende Rolle spielen. Oft sind es wirtschaftliche und ökologische Forderungen, die den Vorzug erhalten. Folglich ist die Werkstoffwahl ein Kompromiss, der für den Gebrauch der Produkte und dessen Fertigung nicht immer optimal ist.

Dieser Auswahlprozess von den groben Anforderungen zu den genaueren Anforderungen über mehrere gestalterische Lösungsvarianten ist für den Konstrukteur gegenüber der sofortigen Suche in den umfangreichen Datenbanksystemen letztendlich kreativer, sicherer, präziser, schneller und wirtschaftlicher.

Auch der Wunsch der Konstrukteure nach allgemeingültigen Richtlinien zur verfahrensgerechten und materialsparenden Produktgestaltung und Werkstoffauswahl führen nicht zum Erfolg, weil die vielseitigen und komplexen Produkthanforderungen nicht oder nur begrenzt in Richtlinien berücksichtigt werden können.

### 3 Polymerwerkstoffe

Ziel dieses Abschnittes ist es, dem Konstrukteur und Anwender den chemischen Aufbau der Polymere und deren Werkstoffeigenschaften in einer logischen und kurzgefassten Form zu vermitteln. Nach der Suche einer eindeutigen Erklärung der Grundbegriffe Polymere, Kunststoffe und Werkstoffe in den vielseitigen Normen und Veröffentlichungen wird klar, dass die verschiedenen Definitionen keine schlüssige Abgrenzung zulassen.

Die Ursachen liegen in der relativen jungen Geschichte dieser Werkstoffgruppe. Es begann vor über hundert Jahren mit der Herstellung von künstlichen organischen Werkstoffen, wie Kunsthorn, Celluloid und Phenolharzen, die als „Kunststoffe“ bezeichnet wurden. Verbreitet wurde der Begriff „Kunststoffe“ im deutschsprachigen Raum durch die seit 1911 erscheinende gleichnamige Fachzeitschrift.

Ein Wendepunkt in der Entwicklung der synthetischen Herstellung von organischen Werkstoffen begann ab den 1920er Jahren, als Professor Hermann Staudinger seine grundlegende Arbeit über die Makromoleküle veröffentlichte und den Vorgang der Polymerisation erklärte. Er erbrachte den Nachweis, dass kleine Moleküle, die sogenannten „Monomere“, sich zu größeren Molekülen, den „Polymeren“, verbinden können. Durch diese Erkenntnis bereitete er die Grundlagen der Polymerchemie und erhielt dafür den Nobelpreis für Chemie. In den Folgejahren wurden auf diesen Grundlagen zahlreiche Polymere entwickelt und Theorien zur Polymerchemie erweitert.

Nach dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik sind **Polymere** chemische Verbindungen aus organischen oder anorganischen Makromolekülen. Sie werden aus Naturstoffen oder synthetischen Stoffen hergestellt. In der Regel sind sie zusammen mit Zusatzstoffen die Vorprodukte zur Herstellung von Polymerprodukten. Eine weitere Einteilung erfolgt nach dem thermomechanischen Verhalten in die Stoffgruppen Plastomere, Elastomere und Duromere. Mit den Untergruppen amorphe, teilkristalline, mesomorphe und vernetzte Polymere und weiter in ihrer monomeren Zusammensetzung in Homopolymere und Copolymere sowie in Polymermischungen (Polymerblends) sind die Polymerstrukturen abgegrenzt.

**Werkstoffe** sind Materialien, die in einem Produktionsprozess durch Formgebung, Formveränderung, Verbunde mit anderen Materialsystemen und Stoffeigenschaftsänderung zum Bestandteil des Produktes werden. Werkstoffe sind in der Regel Festkörper und bestimmen die physikalischen, chemischen, technologischen und ökologischen Gebrauchseigenschaften der Produkte.

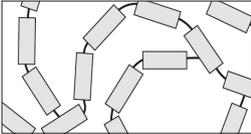
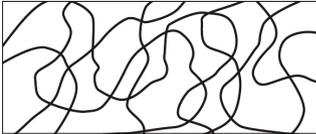
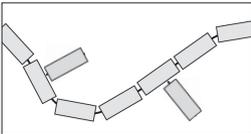
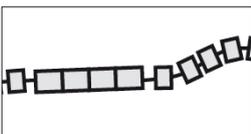
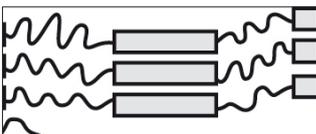
Zum besseren Verständnis des Aufbaus der Polymere und deren Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften benutzen die Autoren in diesem Buch den zusammenführenden Grundbegriff **Polymerwerkstoffe**.

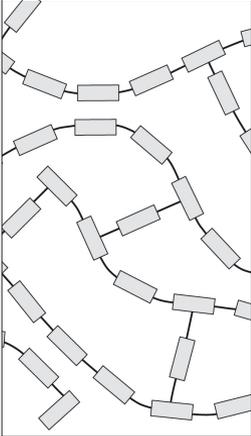
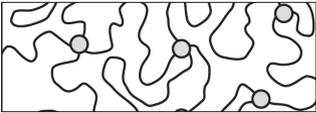
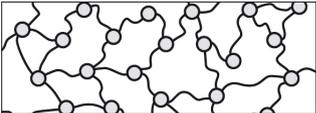
### 3.1 Struktur-Eigenschafts-Beziehungen

Polymerwerkstoffe sind Makromoleküle, die aus vielen, sich wiederholenden monomeren Grundbausteinen bestehen. Die Art des molekularen chemischen Aufbaus und die physikalische Struktur der Makromoleküle bestimmen die Eigenschaften der Polymerwerkstoffe. Nach ihrem thermischen Zustandsverhalten werden Polymerwerkstoffe

in Thermoplaste, thermoplastische Elastomere, vernetzte Elastomere und Duroplaste eingeteilt. Die Thermoplaste werden weiterhin nach ihrem strukturellen Aufbau und Ordnungszustand der Moleküle in amorphe, teilkristalline und mesomorphe Werkstoffe unterschieden.

Tabelle 2: Molekularer und struktureller Aufbau der Polymerwerkstoffe

Molekularer Aufbau	Struktureller Aufbau	Molekularer Verbund	Polymergruppe (Thermisches Verhalten)
<b>Linear ungeordnet verzweigter Kettentyp</b> 	amorph 	Ordnungsloser, knäuelartiger Zustand der Molekülketten ohne chemische Verbindung der Makromoleküle untereinander.	<b>Amorphe Thermoplaste</b> <i>reversibel verarbeitbar</i>
<b>Linear, teilweise geordneter und verzweigter Kettentyp</b> 	teilkristallin 	Teilweise lamellenartiger Verbund (Kristallite) von längeren Molekülketten ohne chemische Verbindung der Makromoleküle untereinander. Diese Kristallitbildung ist inhomogen und von der Erstarrungsgeschwindigkeit des Polymers abhängig. Der amorphe Anteil ist bei schneller Abkühlung höher.	<b>Teilkristalline Thermoplaste</b> <i>reversibel verarbeitbar</i>
<b>Linear streng geordneter Kettentyp</b> 	mesomorph 	Die Makromoleküle weisen flüssige und starre Segmente auf. Die starren Segmente bilden bereits in der Schmelze sehr kleine Faserstrukturen (Fibrillen), die im festen Zustand zu selbstverstärkenden kristallinen Strukturen ohne chemische Verbindung der Makromoleküle führen.	<b>Flüssigkristalline Thermoplaste</b> Flüssigkristalline Polymere (LCP) <i>reversibel verarbeitbar</i>

Molekularer Aufbau	Struktureller Aufbau	Molekularer Verbund	Polymergruppe (Thermisches Verhalten)
<b>Vernetzter Kettentyp</b> 	weitmaschig vernetzt 	Reversible physikalische Vernetzung von langen Molekülketten durch Nebenvalenzkräfte, wie Wasserstoffbrücken, Dipol- oder Dispersionskräfte.	<b>Thermoplastische Elastomere (TPE)</b> <i>reversibel verarbeitbar</i>
	weitmaschig vernetzt 	Irreversible chemische Vernetzung von langen Molekülketten durch Hauptvalenzkräfte.	<b>Vernetzte Elastomere (Gummi)</b> <i>nach der Formgebung irreversibler Zustand</i>
	engmaschig vernetzt 	Irreversible chemische Vernetzung der Molekülstrukturen durch Hauptvalenzkräfte.	<b>Duroplaste</b> <i>nach der Formgebung irreversibler Zustand</i>

Ein weiterer wichtiger Struktur-Eigenschafts-Parameter ist die Größe der Makromoleküle. Unvernetzte Polymerwerkstoffe bestehen aus einem Gemisch unterschiedlich langer Molekülketten. Die Größe des molaren Massewertes (g/mol) ist ein statistischer Mittelwert aus dem Verteilungsspektrum der enthaltenen Makromoleküle. Hohe molare Massewerte verbessern Steifigkeit, Festigkeit und Zähigkeit der Produkte, verschlechtern aber das Schmelz- und Fließverhalten der Werkstoffe bei der Verarbeitung. Für vernetzte Polymere ist die molare Masse nicht bestimmbar.

Weiterhin können die Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Polymeren durch Mischungen der monomeren Grund-

bausteine bzw. der Makromoleküle gezielt verändert werden. Bestehen die Makromoleküle aus artgleichen Grundbausteinen, werden sie als **Homopolymere** bezeichnet. Sind die Grundbausteine unterschiedlicher Art, bezeichnet man sie als **Copolymer**. Eine Mischung aus verschiedenen Makromolekülen wird als **Polymer-Blend** bezeichnet.

Außerdem können durch Zugabe von Verstärkungs- und Füllstoffen, Stabilisatoren, Flexibilisatoren, Weichmachern, Farb-, Flammschutz-, Schmier-, Gleit- oder Treibmitteln, Antistatika sowie elektrisch leitfähigen Stoffen die Werkstoffeigenschaften besser den Gebrauchsanforderungen der Produkte angepasst werden.



Beachtlich ist die Wasseraufnahme bei den Typen PA 6 und PA 66 mit > 2,5 % unter Normalklima bei 23 °C und 50 Prozent relativer Feuchte. Dagegen ist die Wasseraufnahme von PA 12 mit < 1 % relativ niedrig. Der Konstrukteur nutzt in der Regel die Gebrauchseigenschaftskennwerte der konditionierten (feuchten) Werkstoffe, d. h., für ungefülltes PA 6 und PA 66 liegt der Feuchtegehalt zwischen 2,5 und 3,0 % und bei glasfaserverstärkten PA 6/PA 66 zwischen 1,7 und 2,1 %. Zu beachten ist, dass vor jeder thermischen Verarbeitung die Polyamide getrock-

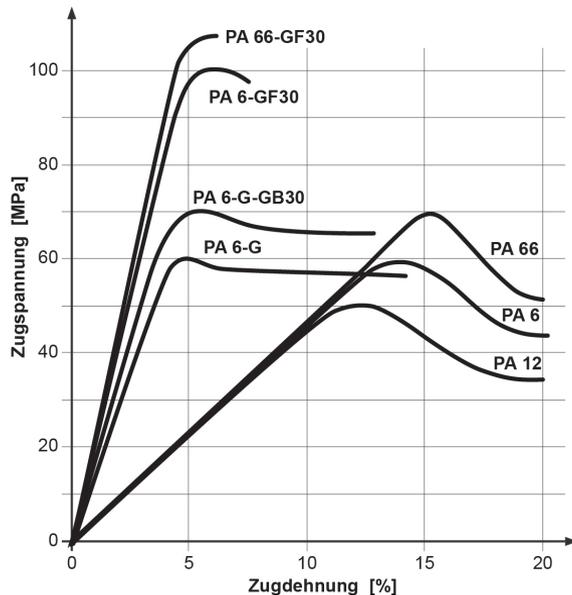


Bild 7: Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Kurven für konditionierte Polyamid-Werkstoffe

net werden müssen, um Fehler am Produkt durch Feuchtigkeitsschlieren zu vermeiden.

#### Wesentliche Merkmale von konditionierten Polyamid-Werkstoffen: PA 6 und PA 66 ungefüllt

- Dichte 1,12 bis 1,15 g/cm<sup>3</sup>
- Gute Zähigkeit und Schlagfestigkeit nach Konditionierung
- Hohe Ermüdungsfestigkeit und geringe Spannungsrissbildung
- Hohe Abriebfestigkeit und gute Gleiteigenschaften
- Gebrauchstemperaturbereich von -40 bis +100 °C
- Geringe Wärmeausdehnung
- Geringe elektrische Isolationseigenschaften \*
- Hoher dielektrischer Verlustfaktor \*
- Eingeschränkte chemische Beständigkeit \*
- Relativ hohe Wasseraufnahme
- In allen Farbtönen einfärbbar \*
- Ungefärbt milchig opak
- Spezielle amorphe PA-Typen sind fast glasklar

\* Merkmale auch für glasfasergefüllte Typen zutreffend

#### PA 12 ungefüllt

- Dichte 1,01 bis 1,02 g/cm<sup>3</sup>
- Hohe Zähigkeit und Schlagfestigkeit
- Hohe Ermüdungsfestigkeit und geringe Spannungsrissbildung
- Sehr hohe Abriebfestigkeit und gute Gleiteigenschaften
- Gebrauchstemperaturbereich von -70 bis +70 °C
- Wärmeausdehnung höher als bei PA 6 und PA 66
- Bessere elektrische Isoliereigenschaften als bei PA 6 und PA 66
- Niedriger dielektrischer Verlustfaktor

### 3.5.1 Stereolithographiewerkstoffe (SL)

Stereolithographiewerkstoffe sind unter ultravioletter Strahlen vernetzte Polymerharze.

Diese Harze bestehen aus einem Gemisch von:

- Epoxid-, Acryl-, Vinylester- und/oder Vinyletherpolymeren
- Flexibilisatoren (Kettenverlängerer)
- Füllstoffen
- Vernetzungssystemen
- Alterungsschutz- und Verarbeitungshilfsstoffen

Das flüssige bis pastöse Harzgemisch polymerisiert durch eine photochemische Reaktion zu einem duroplastischen Copolymer. Bei UV-Laserstrahlanlagen werden bevorzugt Epoxid-Acrylat-Harzgemische und bei digitalen UV-Lichtprojektoren Acrylat-Harzgemische verwendet. Die Werkstoffe sind thermisch irreversibel und können kurzzeitig bis unterhalb der Zersetzungstemperatur die geometrische Form erhalten. Stereolithographiewerkstoffe sind nicht schmelz- und schweißbar.

Durch Variation der Harzzusammensetzung, der Füll- und Zusatzstoffe können die

- mechanischen Eigenschaften,
  - thermische Belastbarkeit,
  - optische Transparenz und UV-Stabilität,
  - Maßgenauigkeit,
  - Medienbeständigkeit und
  - Prozesssicherheit
- gezielt verändert werden.

#### Wesentliche Merkmale der Stereolithographiewerkstoffe:

- Dichte 1,10 bis 1,80 g/cm<sup>3</sup>, je nach Zusammensetzung
- Mechanische Eigenschaften abhängig von Harzsystem und Zusatzstoffen
- Gebrauchstemperaturbereich von -20 bis +120 °C, je nach Harzsystem und thermischer Nachbehandlung
- Geringe Wärmeausdehnung
- Gute elektrische Isoliereigenschaften
- Chemische Beständigkeit und Wasseraufnahme abhängig von Harzsystem und Füllstoffart
- Allgemein geringe UV-Stabilität
- Eingeschränkt einfärbbar
- Ungefärbt transparent, weiß, gelblich, grau oder schwarz
- Spezielle Typen sind glasklar

Eine Zusammenstellung der wesentlichen konstruktionsrelevanten Werkstoffmerkmale und Kennwerte ist in den folgenden Tabellen und Bildern enthalten.

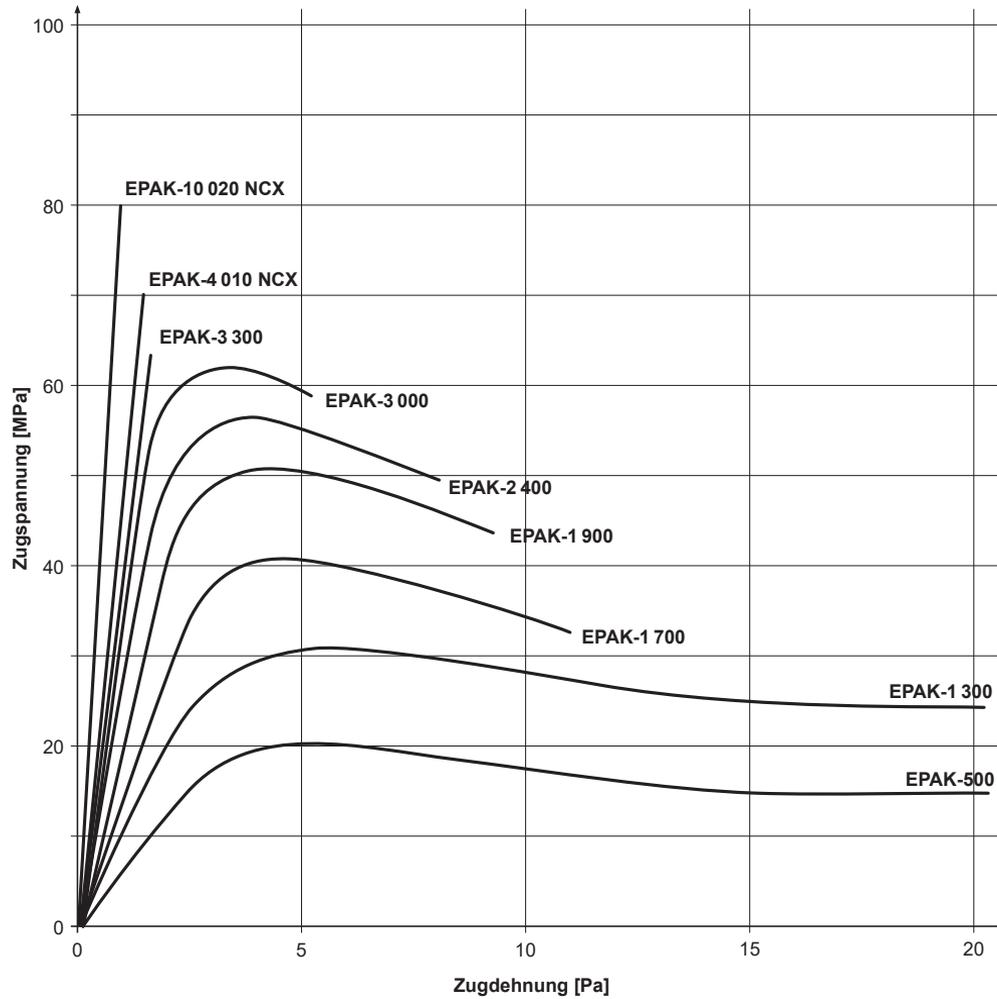


Bild 23: Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Kurven für Stereolithographiewerkstoffe

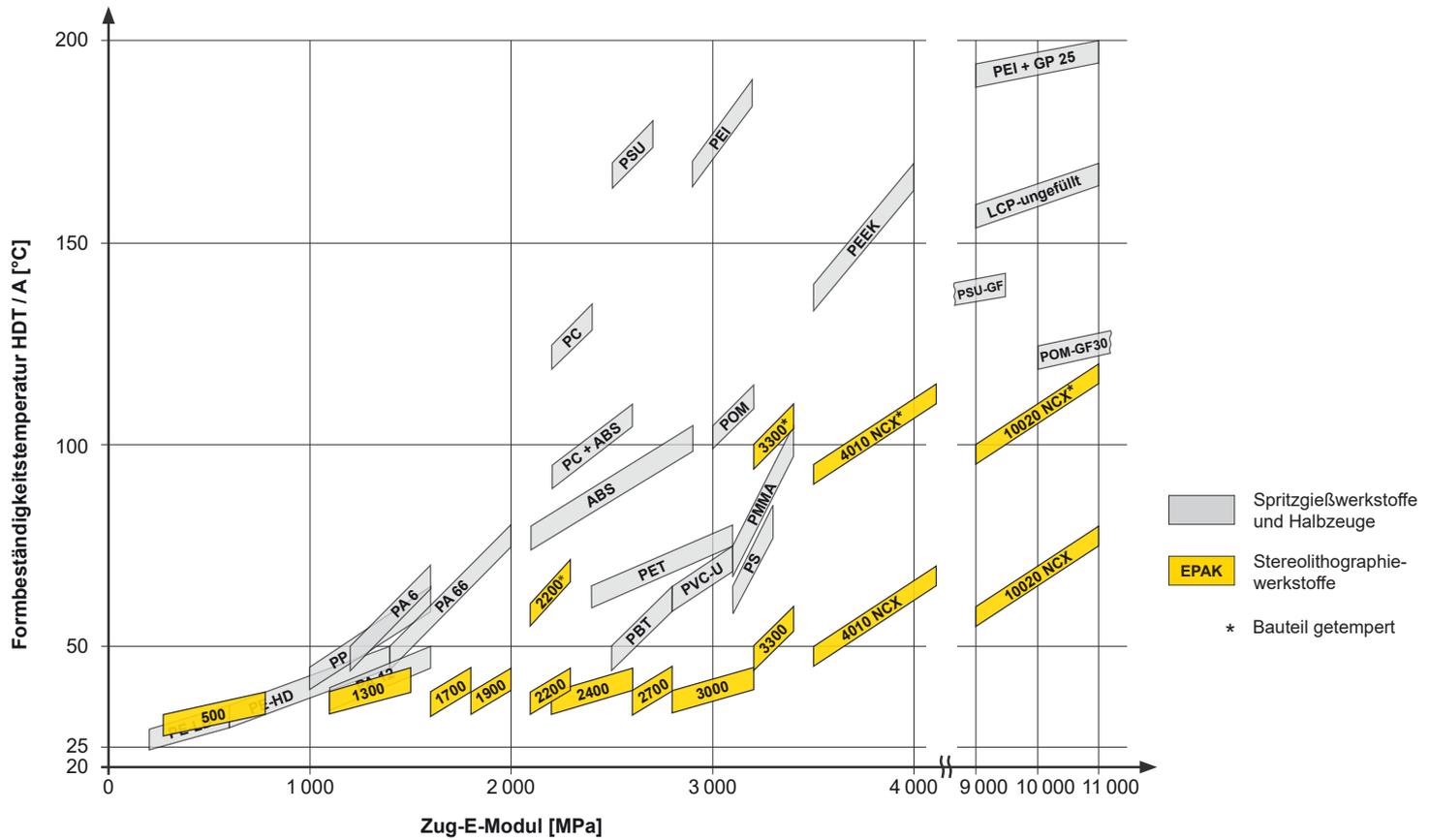


Bild 24: Zug-E-Modul und Formbeständigkeitstemperatur der Stereolithographiewerkstoffe im Vergleich mit Spritzgießwerkstoffen

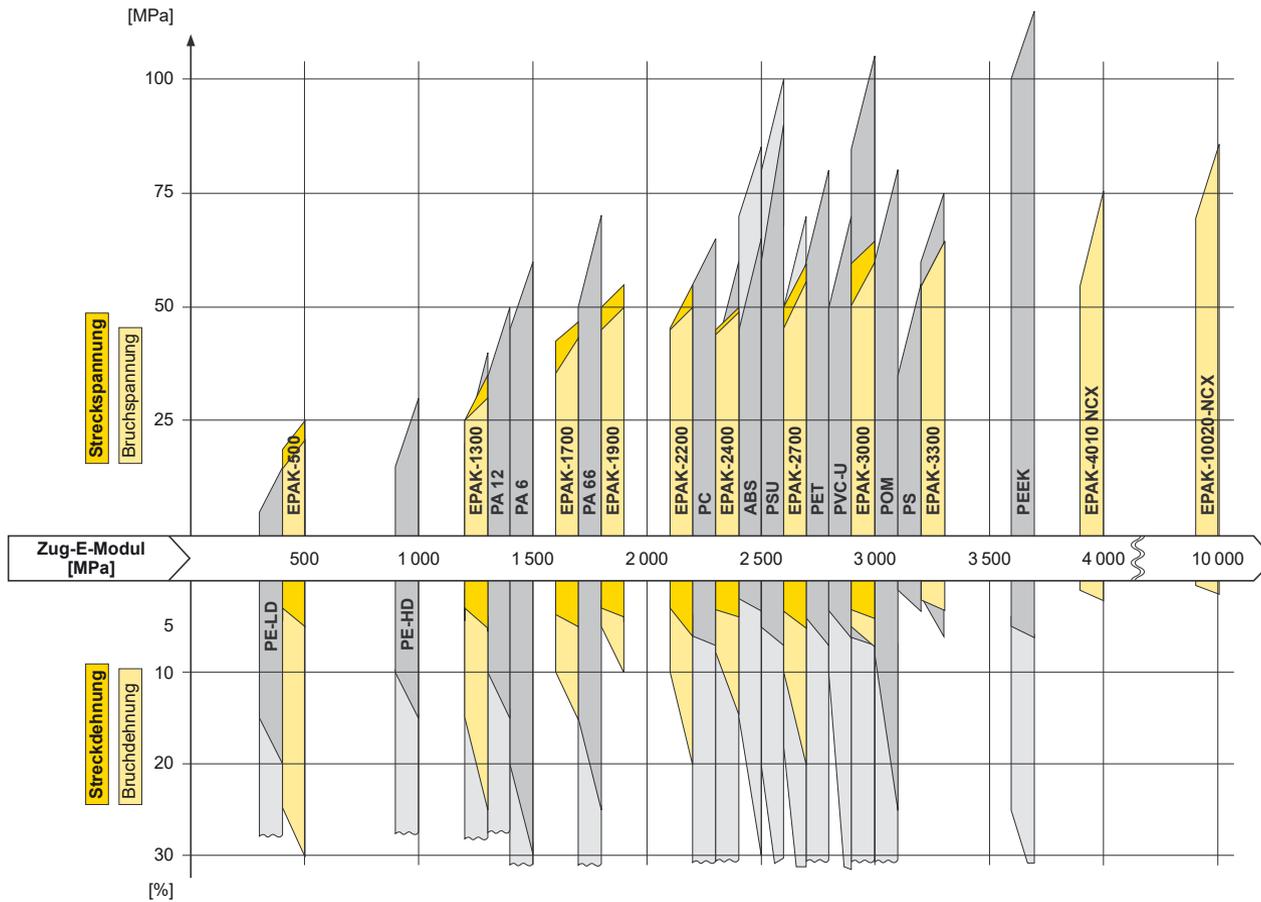


Bild 25: Zugspannungs- und Dehnungskennwerte der Stereolithographiewerkstoffe im Vergleich mit Spritzgießwerkstoffen

### 3.6 Werkstoffe für die subtraktiven Fertigungsverfahren

Die spanende Herstellung von Produkten aus natürlichen organischen Werkstoffen gehört zu den ältesten Fertigungsverfahren der Menschheit. Alle Pflanzen und Tiere enthalten in ihrem Aufbau Polymerwerkstoffe, zum Beispiel Hölzer, Bernstein, Tierknochen, Horn, Perlmutter usw. Aus ihnen wurden Waffen, Werkzeuge, Haus- und Hofgeräte sowie Schmuck hergestellt. Erst Ende des 19. Jahrhunderts begann die industrielle Herstellung von künstlichen organischen Polymerwerkstoffen (Kunststoffen), wie Kunsthorn, Phenolharz- und Cellulose-Kunststoffen. Die zunehmende Akzeptanz der Eigenschaftsmerkmale von synthetisch hergestellten Polymerwerkstoffen sowie die neuen Möglichkeiten zur kostensenkenden mechanisierten und automatisierten Fertigung von Fräs- und Drehteilen mobilisierten nach 1900 die weitere Entwicklung von Halbzeugen aus Polymerwerkstoffen.

Ein weiterer Zuwachs kam mit der computerintegrierten Entwicklung und Fertigung von neuen Produkten. Bereits Anfang der 1980er Jahre produzierten Entwicklungsbereiche aus den 3D-Konstruktionsdatenmodellen mittels 3D-CNC-Fräsen Modelle, Muster und Prototypen aus Polymerwerkstoffen. So entstand sehr früh der Begriff „Rapid Prototyping“. Seitdem steigerte sich die Auswahl an spanbaren thermo- und duroplastischen Halbzeugen enorm. Das Angebot reicht von den leicht spanbaren Hartschaumstoffen für den Modellbau über hochbelastbare Polymerwerkstoffe für Funktionsmuster und Prototypen bis zu marktfähigen Produkten für die Einzel- oder Serienfertigung. So finden subtraktiv gefertigte Teile im Fahrzeug- und Maschinenbau,

in der Elektro- und Medizintechnik, der Land- und Forstwirtschaft, im Bau- und Transportwesen und in der Luft- und Raumfahrt ihre Anwendung.

Die Vorteile der spanenden Fertigung von Halbzeugen oder Produktrohlingen sind die höheren erreichbaren Maßgenauigkeiten gegenüber den additiven und formativen Verfahren.

Nachteile sind die nicht 1:1 vergleichbaren mechanischen Eigenschaften auf Spritzgießformteile vom gleichen Polymertyp und die Einschränkungen in den begrenzten Zerspanungstiefen zur Herstellung tief im Inneren des Teiles liegender Geometrien sowie Hinterschnitte.

Für eine Vorauswahl der spanend bearbeitbaren Polymerwerkstoffe können die Werkstoffmerkmale der bereits beschriebenen Thermo- und Duroplaste übernommen werden. Die finale Auswahl der Werkstoffe ist mit dem Lieferanten und Fertiger abzustimmen.

## 4 Werkstoffeigenschaften – Prüfverfahren – Werkstoffkennwerte

Um für eine Anwendung den richtigen Polymerwerkstoff zu finden, müssen einerseits das Anforderungsprofil der Produkte und andererseits die Werkstoffeigenschaften bekannt sein. In diesem Abschnitt werden deshalb für die wesentlichsten Werkstoffeigenschaften die erforderlichen Prüfverfahren und die bestimmbaren Werkstoffkennwerte vorgestellt.

Die Darstellungen der Werkstoffeigenschaften und ihrer Prüfverfahren sind allgemein und verständlich gehalten, um dem Leser den Umgang mit den Werkstoffkennwerten in der Praxis zu erleichtern. Bei der Bewertung der Kennwerte muss der Anwender einschätzen können, welche Anforderungen damit erfüllt bzw. was nur teilweise oder kaum erreicht werden kann.

Die Prüfverfahren zur Kennwertermittlung konzentrieren sich hauptsächlich auf folgende Anwendungsgebiete:

1. **Wareneingangskontrolle**, um festzustellen, ob die Werkstoffe typ- bzw. spezifikationsgerecht geliefert oder die vertraglich geforderten Kennwerte eingehalten sind.
2. **Fertigungskontrolle**, um festzustellen, ob die Qualität des Fertigungsablaufes und der Produkte gesichert sind.
3. **Werkstoffvergleichende Kontrolle**, um festzustellen, ob weitere Werkstoffe als gleichwertig anzusehen sind oder worin sie sich unterscheiden.
4. **Werkstoffqualifizierung**, um Kennwerte zu erhalten, die als Grundlage für die Produktgestaltung und Gebrauchstüchtigkeit dienen können.

Für Wareneingangskontrolle, Fertigungskontrolle und werkstoffvergleichende Kontrolle sind die nach DIN EN ISO 10350 ermittelten Kennwerte zum Vergleich der einzelnen Werkstofftypen und Chargen gut nutzbar. Dagegen sind die Kennwerte zur Werkstoffqualifizierung und damit für die Charakterisierung der Produkteigenschaften nur bedingt nutzbar. Der Grund ist, dass die Werkstoffeigenschaften nicht nur vom Werkstofftyp, sondern auch von der geometrischen Gestalt des Prüfkörpers bzw. des Produktes, der Herstellungsart und den Fertigungsbedingungen abhängig sind.

Allgemein gilt in der Praxis, für Polymerwerkstoffe können alle messtechnisch erfassbaren Eigenschaften geprüft werden, aber nicht alle Kennwerte müssen für einen Anwendungszweck maximal nutzbar sein. Im Einzelfall wählt der Konstrukteur den Werkstoff, bei dem die geforderten Kennwerte mit großer Sicherheit den Anwendungszweck erfüllen oder sich in einem ähnlichen Anwendungsfall bereits bewährt haben.

Um den Aufwand bei der Werkstoffvorauswahl und der Kennwertsuche in überschaubaren Grenzen zu halten, konzentriert sich der Konstrukteur zunächst auf die Sicherung der signifikanten Werkstoffeigenschaften.

## Charakteristische Werkstoffeigenschaften

### 1. Mechanische Eigenschaften

- Zug-E-Modul
- Streckspannung/ Streckdehnung
- Bruchspannung/ Bruchdehnung
- Härte

### 2. Thermische Eigenschaften

- Formbeständigkeitstemperatur
- Gebrauchstemperaturen
- Längenausdehnung
- Wärmeleitfähigkeit

### 3. Elektrische Eigenschaften

- Isolationseigenschaften/ Widerstandswerte
- Durchschlagfestigkeit/ Spannungswerte
- Dielektrische Eigenschaftswerte

### 4. Sonstige Eigenschaften

- Dichte
- Wasseraufnahme
- Witterungsbeständigkeit
- Chemikalienbeständigkeit
- Brennbarkeit
- Lichtdurchlässigkeit
- Einfärbbarkeit

### 5. Werkstoffpreise

Spezielle Eigenschaften und Zulassungen sollte der Konstrukteur mit dem Fertiger und Werkstofflieferanten abstimmen.

## 4.1 Mechanische Eigenschaften

### 4.1.1 Zugspannungs-Dehnungs-Verhalten

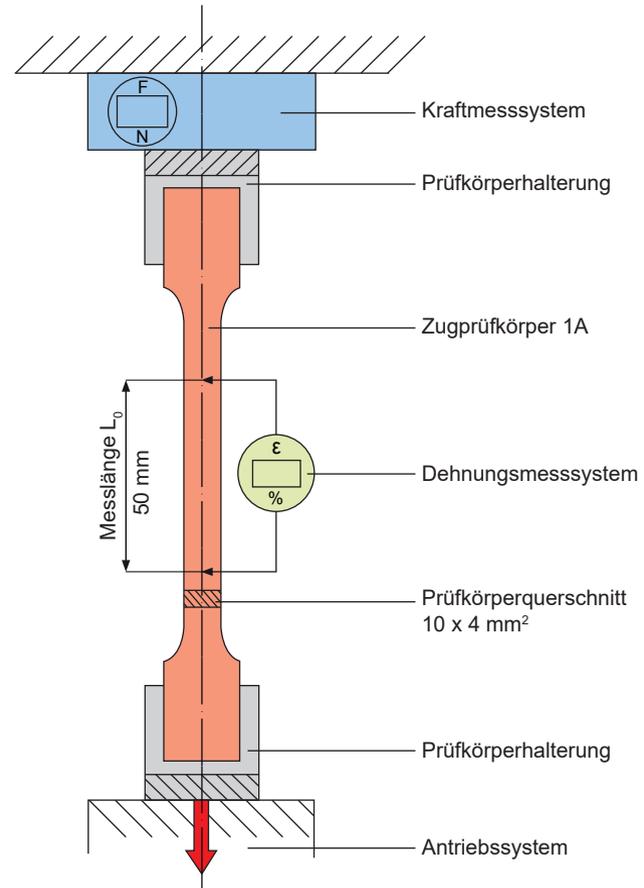


Bild 40: Einachsiger Zugversuch

Der Zugversuch an Polymerwerkstoffen ist die bevorzugte Prüfung zur Ermittlung des mechanischen Steifigkeits-, Festigkeits- und Verformungsverhaltens (DIN EN ISO 527-1). Mit genormten Prüfkörpern, auch als Vielzweckprüfkörper 1A (DIN EN ISO 3167) für weitere Prüfmethode einsetzbar, wird in Universalprüfmaschinen das einachsige Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Werkstoffe ermittelt.

Aus den Spannungs-Dehnungs-Kurven können folgende charakteristischen Werkstoffkenngrößen anschaulich dargestellt werden:

### Zug-E-Modul

Die Steigung der Kurven bei Belastungsbeginn beschreibt die Steifigkeit und ist ein Maß für die energieelastischen Eigenschaften der Werkstoffe.

### Zugspannung

Der Zugspannungsverlauf beschreibt die Zugspannungsänderung bei zunehmender Zugdehnung des Werkstoffes.

### Zugdehnung

Der Zugdehnungsverlauf beschreibt die Verformungsfähigkeit des Werkstoffes bei zunehmender Krafteinwirkung.

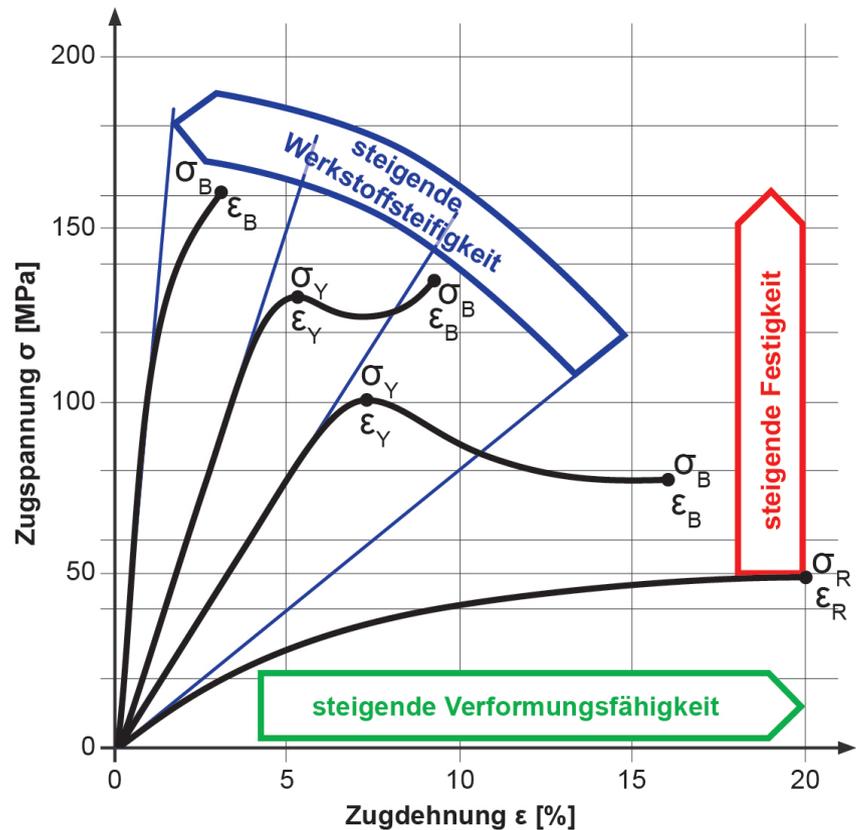
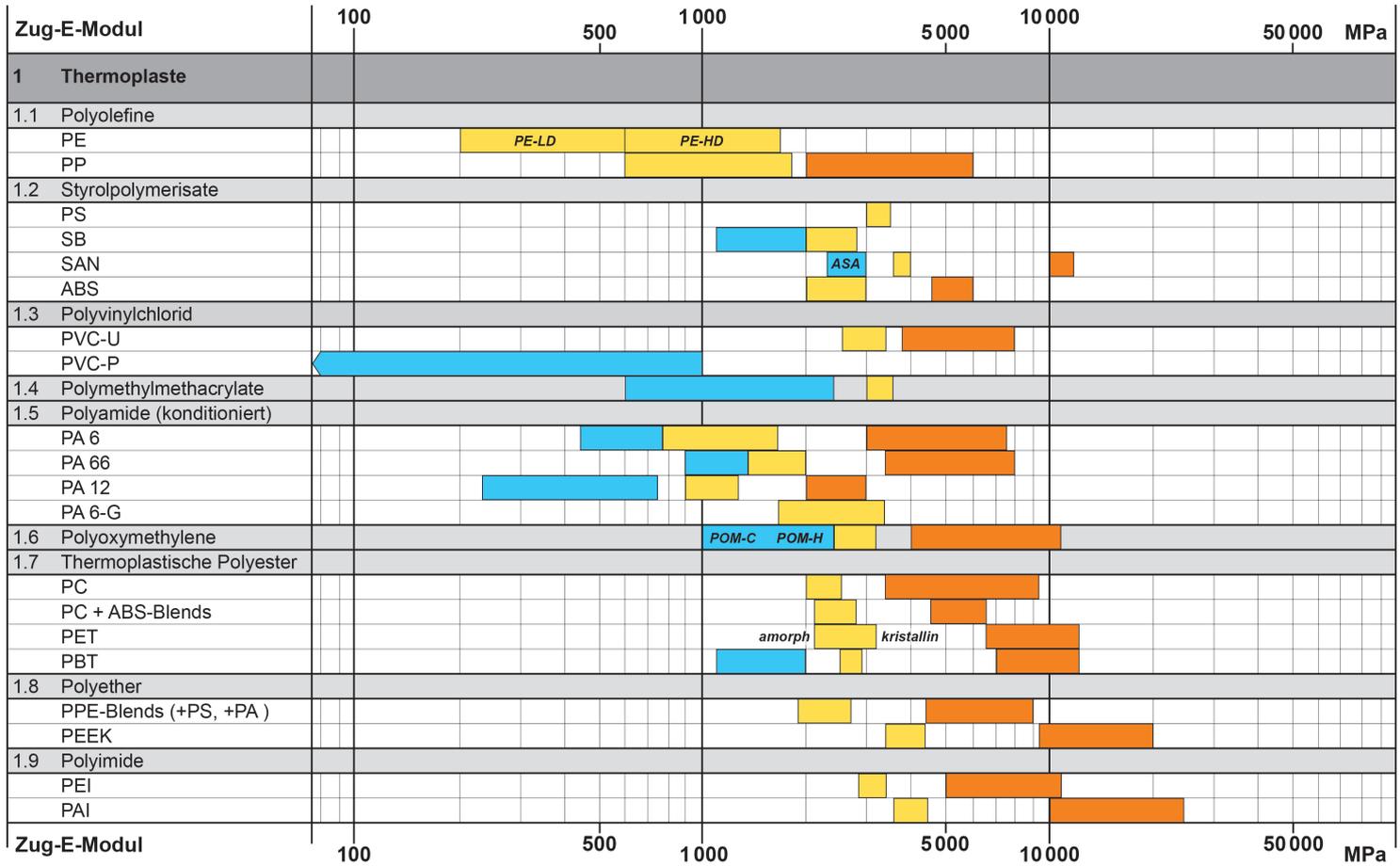


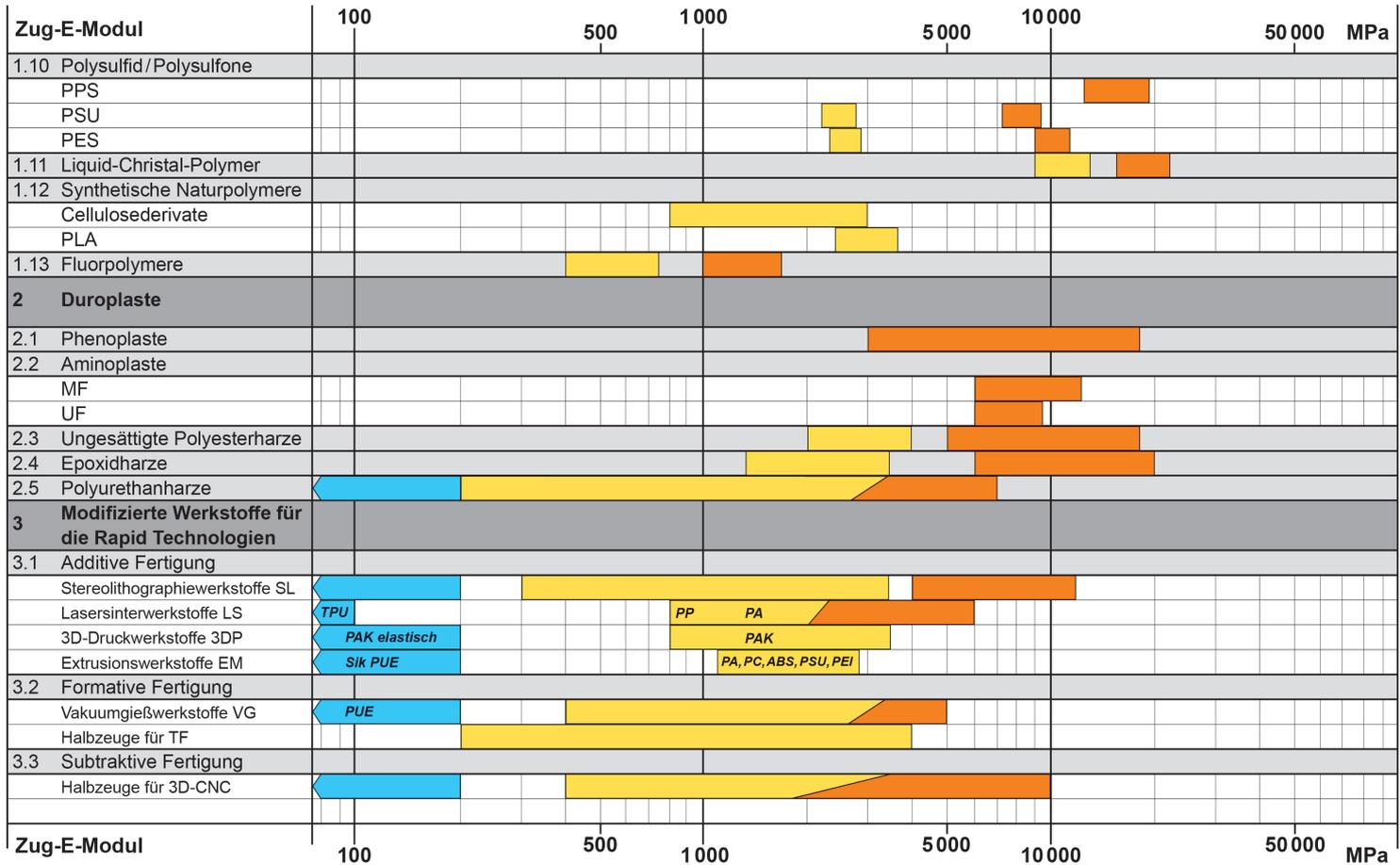
Bild 41: Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Kurven

Tabelle 13.1: Zug-E-Modul-Werte für thermo- und duroplastische Werkstoffe



Legende: ■ gummi-elastisch/schlagzäh modifiziert    ■ ungefüllt    ■ gefüllt/verstärkt

Tabelle 13.2: Zug-E-Modul-Werte für thermo- und duroplastische Werkstoffe



Legende:  gummi-elastisch /schlagzäh modifiziert  ungefüllt  gefüllt /verstärkt

## 4.2 Thermische Eigenschaften

### 4.2.1 Thermomechanisches Belastungsverhalten

Das thermomechanische Belastungsverhalten von Polymerwerkstoffen wird von ihrem molekularen und strukturellen Aufbau bestimmt. Durch Temperaturveränderung wird die Beweglichkeit der Moleküle verändert, was besonders die mechanischen Eigenschaften beeinflusst. Sinkt die Temperatur, verringert sich die Beweglichkeit der Moleküle bis zur Unbeweglichkeit. Den Übergang von einer gewissen Beweglichkeit zur Unbeweglichkeit nennt man Glasübergangstemperatur. Umgekehrt ist dieselbe Temperatur als Erweichungstemperatur bekannt, wenn man von einem harten, spröden Werkstoff ausgeht, in dem alle Moleküle eingefroren sind und bei Wärmezufuhr immer beweglicher werden.

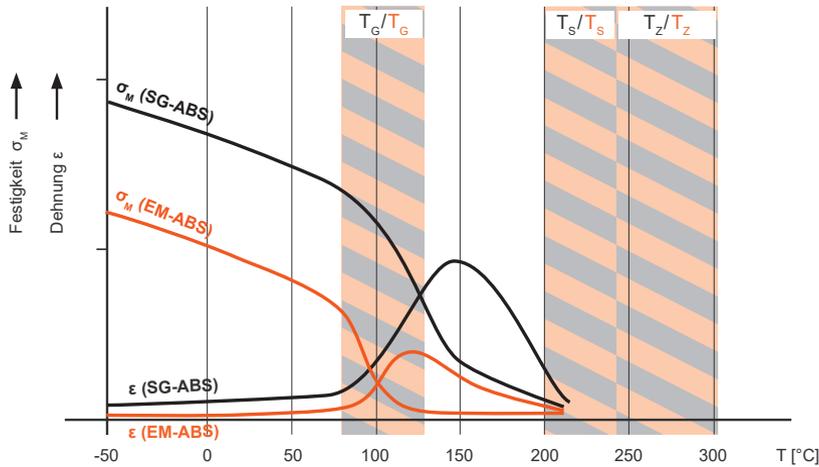
#### Amorphe Thermoplaste

erreichen mit der Glasübergangstemperatur den thermoelastischen Bereich, in dem mit kleinen Umformkräften große Formänderungen realisiert und durch Abkühlen eingefroren werden können (Thermoformen). Bei weiterer Erwärmung nimmt die Beweglichkeit der Moleküle zu und sie verlieren ihren Zusammenhalt. Die festigkeitsbildenden Knäuelstrukturen gleiten leichter aneinander vorbei. Im Schmelzbereich ist der thermoplastische Zustand erreicht. Der Werkstoff lässt sich umformen (Spritzgießen und Extrudieren). Dieser Bereich wird nach oben durch den Zersetzungstemperaturbereich begrenzt. Der Anwendungsbereich amorpher Thermoplaste liegt unterhalb des Glasübergangsbereiches.

#### Teilkristalline Thermoplaste

haben amorphe und kristalline Bereiche. Bei Wärmezufuhr werden nach Erreichen der Glasübergangstemperatur zuerst die Moleküle der amorphen Bereiche beweglicher. Der kristalline Anteil benötigt mehr Wärmeenergie, bis die gesamte Molekülkette beweglicher wird. Die Kristallite halten durch ihre höhere Erweichungstemperatur den amorphen Anteil des Moleküls in Form und unterdrücken das Schmelzen des Werkstoffes. Erst, wenn die Kristallite schmelzen, verliert der Werkstoff seine Form, wird weich und schmilzt innerhalb eines viel engeren Temperaturbereiches als amorphe Thermoplaste. Für die Darstellung des Verformungsverhaltens im Bild 52 wurde Polyamid (PA) gewählt. Die mechanischen Eigenschaften der meisten PA-Typen unterscheiden sich nur wenig voneinander. Sie werden von der Struktur, der Anzahl der Amid-Gruppen im Molekül, der Kristallinität und dem Feuchtigkeitsgehalt bestimmt. Speziell die PA-6-Typen sind im trockenen Zustand unmittelbar nach der Verarbeitung hart und spröde. Nach der Feuchtigkeitsaufnahme aus der Atmosphäre oder einer Wasserlagerung werden sie sehr zäh. Die weichmachende Wirkung des Wassers verbessert die Beweglichkeit der Molekülketten und die Glasübergangstemperatur fällt von über +30 auf unter -20 °C. Die beachtlichen Werte von PA 6 resultieren aus der höheren Werkstoffdichte und Anzahl der polaren Amid-Gruppen gegenüber PA 12. Der Anwendungsbereich teilkristalliner Thermoplaste liegt oberhalb des Glasübergangsbereiches und endet vor dem Erreichen des Kristallitschmelzbereiches.

### Amorphe ABS-Polymere



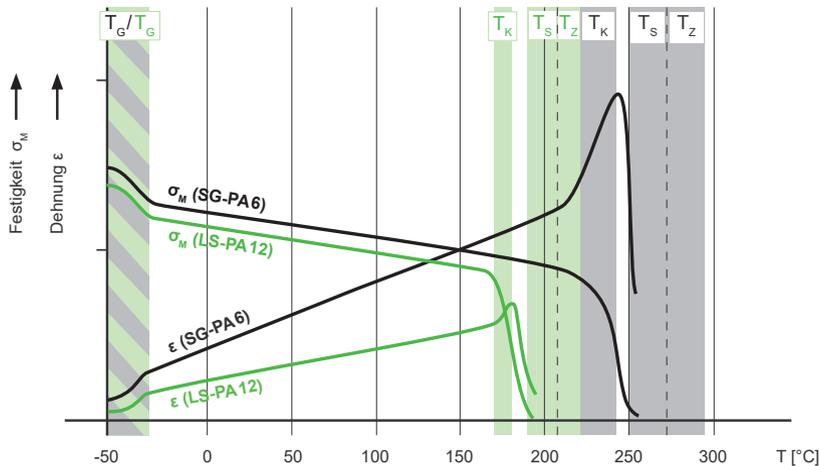
### Schematische Darstellung: $\sigma_M = f(T)$ ; $\epsilon = f(T)$ für ABS-Spritzguss und ABS-Extrusionsformen

#### Legende

- $T_G$  Glasübergangstemperaturbereich
- $T_S$  Schmelztemperaturbereich
- $T_Z$  Zersetzungstemperaturbereich

Bild 51: Veränderung der Festigkeit und Dehnung von amorphen Thermoplasten bei Temperaturerhöhung

### Teilkristalline PA-Polymere



### Schematische Darstellung: $\sigma_M = f(T)$ ; $\epsilon = f(T)$ \* für PA 6-Spritzguss und PA 12-Lasersintern

#### Legende

- $T_G$  Glasübergangstemperaturbereich
- $T_K$  Kristallitschmelztemperaturbereich
- $T_S$  Schmelztemperaturbereich
- $T_Z$  Zersetzungstemperaturbereich

\* Festigkeits- und Dehnungswerte wurden am konditionierten Werkstoff ermittelt

Bild 52: Veränderung der Festigkeit und Dehnung von teilkristallinen Thermoplasten bei Temperaturerhöhung



## 5 Zusammenfassung

Die Rapid-Manufacturing-Verfahren erschließen sich seit Jahren stetig neue Anwendungsbereiche. Verbesserte Werkstoffe sowie leistungsfähigere Anlagen- und Computertechnik gestatten neben der schnellen Modell-, Muster- und Prototypenfertigung inzwischen auch die Fertigung sehr komplexer marktfähiger Produkte in Einzelstücken oder Kleinserien. Aus dem Betriebsmittelbau, der sehr schnellen Herstellung von Vorrichtungen, Werkzeugen und Formen, sind sie ebenfalls nicht mehr wegzudenken.

In diesem Handbuch sind für die gebräuchlichsten Formgebungsverfahren die wesentlichen Polymerwerkstoffe mit ihren Kenngrößen zur Charakterisierung der Produkteigenschaften in übersichtlicher Form und mit einheitlichem Bezugssystem dargestellt. Das erleichtert dem Konstrukteur die Auswahl des geeigneten Werkstoffes für den jeweiligen Anwendungsfall und verbessert die werkstoffgerechte Gestaltung der Produkte.

Ist der Konstrukteur bei der Werkstoffwahl dennoch unsicher, kann er mittels der Rapid-Manufacturing-Verfahren Muster und Prototypen herstellen. So lassen sich fragile Eigenschaftskennwerte und Belastungsgrenzen am konkret gestalteten Produkt mit Ersatzwerkstoffen simulieren und qualifiziert bestimmen. Das setzt voraus, dass die Werkstoffkennwerte normgerecht ermittelt werden und die herstellungsbedingten Verfahrenseinflüsse auf die Produkteigenschaften bekannt sind.

Mit der Auswahl des Werkstoffes kann der Konstrukteur entscheidend die Produkteigenschaften und die Qualität des Fertigungsprozesses beeinflussen. Allerdings spielen die Gebrauchseigenschaften des Produktes und die Verarbeitungseigenschaften des Werkstoffes mitunter keine entscheidende Rolle. Oftmals sind es wirtschaftliche und ökologische Forderungen, die den Vorzug erhalten. Folglich bildet die Werkstoffwahl einen Kompromiss, der für die Fertigung und den Gebrauch des Produktes nicht immer optimal ist. Aus diesem Grund muss der Konstrukteur der Gestaltung des Produktes und der Fertiger der sicheren Beherrschung des Fertigungsprozesses größte Aufmerksamkeit beimessen.

Dieses Buch ist für den Konstrukteur im beruflichen Alltag ein Arbeitsmittel bei der Werkstoff-Vorauswahl. Anhand der Schlüsselinformationen aus den vorgewählten Werkstoffkenngrößen und Kennwerten kann er die finale Werkstoffauswahl detaillierter und lieferantenbezogen fortführen. Dazu kann er Werkstoffdatenbanken, spezielle Lieferanteninformationen und verbindliche Angebote nutzen. Mit diesem schrittweisen Vorgehen von den abstrakten zu den konkreten Werkstoffanforderungen findet der Konstrukteur letztendlich sehr schnell und zuverlässig den optimalen Werkstoff für den jeweiligen Anwendungsfall.



ISBN 978-3-9822135-5-2



9 783982 213552

## Rapid Manufacturing #Polymerwerkstoffe

Dieses Kompendium gibt Produktentwicklern und Konstrukteuren einen verfahrensübergreifenden Überblick über die Polymerwerkstoffe, um ihnen die Werkstoffvorauswahl für neue Produkte zu erleichtern. Das Buch liefert sachkundige Informationen zu den konstruktionsrelevanten Werkstoffeigenschaften und zeigt die Potenziale und Grenzen zur Sicherung der Gebrauchstauglichkeit der Produkte. Es ist ein Arbeitsmittel für den beruflichen Alltag in der Produktentwicklung und Produkterprobung.