



# Polymertechnik

Thermoplaste, thermoplastische Elastomere, Duromere und Elastomere

Teil 1 Grundlagen und Verarbeitung der Polymere

Thun, Oktober 2019

KPwB Krebs Polymerwerkstoff-Beratung  
Talackerstrasse 55 A  
CH-3604 Thun  
ckrebs48@bluewin.ch  
[www.kpwb-krebs.ch](http://www.kpwb-krebs.ch)

# Vorwort

Polymerwerkstoffe (Thermoplaste, Thermoplastische Elastomere, Duromere und Elastomere) sind Werkstoffe, welche in der Technik, aber auch in unserem täglichen Gebrauch immer mehr an Bedeutung gewinnen.

Ebenfalls erfahren heute die technischen Biopolymere immer mehr an Bedeutung. Daher sind in dieser Ausgabe ebenfalls die Grundlagen der Biopolymere enthalten.

Heute werden Kunststoffe immer mehr auch im 3D-Druckverfahren verarbeitet. Dabei muss festgestellt werden, dass es eine Vielzahl von 3D-Druckverfahren auf dem Markt gibt und dass diese Verfahren für praktisch alle Werkstoffbereiche (Metalle, Kunststoffe, Gewebe etc.) eingesetzt werden können. In der hier vorliegenden Ausgabe werden einige beschrieben, welche auch für Kunststoffe geeignet sind.

Dieses Buch soll dem Nichtfachmann die Grundlagen und die Verarbeitung der Polymerwerkstoffe näherbringen. Die Ausführungen in diesem Buch sind bewusst einfach gehalten, damit jeder in der Technik beruflich Tätige die für ihn nötigen Grundlagen aus der vorliegenden Broschüre erarbeiten kann. Die Broschüre ist kein Fachbuch für den Spezialisten, sondern ein Lehrbuch für den Anfänger.

Ich bin überzeugt, dem Konstrukteur, aber auch dem Einkäufer ein lehrreiches Buch über ein wichtiges Werkstoffgebiet geschaffen zu haben.

Thun, Juni 2019

Der Verfasser:

Christian Krebs

# Einführung

Die Bezeichnung «Polymerwerkstoff» ist heute noch nicht sehr geläufig. Diese Werkstoffe werden im Allgemeinen als Kunststoffe oder Gummi bezeichnet. Im Nachfolgenden werden diese Begriffe nur noch in Ausnahmefällen verwendet. Es werden die korrekten Bezeichnungen verwendet wie:

- Thermoplaste
- Thermoplastische Elastomere
- Duromere
- Elastomere
- Biopolymere

Dem Polymerwerkstoff einem heute weitverbreiteter, jedoch im Grunde noch recht jungen Werkstoff, werden im Allgemeinen zwei Eigenschaften nachgesagt: preisgünstig und leicht. In diesen beiden Begriffen sind eigentlich auch die wichtigsten Unterscheidungen zu den herkömmlichen Werkstoffen (Metalle usw.) beschrieben.

**Leicht** Die Dichte der meisten Polymerwerkstoffe ist zwischen  $0.9$  und  $1.4 \text{ g/cm}^3$ , also ca. 7-mal leichter als Stahl.

**Preisgünstig** Durch die geringe Dichte der Polymerwerkstoffe kann mit einer bestimmten Masse mehr Volumen hergestellt werden als bei Metallen. Ebenfalls ist beispielsweise die Schmelztemperatur viel geringer, was jedoch auch eine stärkere Temperaturabhängigkeit dieser Werkstoffe bedeutet

Es wird in diesem Buch ebenfalls sehr eingehend der aussergewöhnliche Werkstoff Elastomer (Gummi) beschrieben. Besonders hervorstechend sind sein Rückfederungsvermögen bzw. seine Elastizität. Man kann einen Elastomer Streifen um das Vielfache seiner Ursprungslänge dehnen, ohne dass er reisst. Wenn man ihn danach loslässt, springt er zurück und hat wieder nahezu seine ursprüngliche Form und Länge. In ähnlicher Weise kann man ihn zusammendrücken, biegen oder dehnen und jedes Mal wird er nach dem Entspannen oder Entlasten im Idealfall wieder in die ursprüngliche Form zurückspringen. Kein anderer Werkstoff zeigt eine solche Elastizität.

Die besonderen Eigenschaften sowie das Verhalten dieser Werkstoffe sollen in diesem Buch behandelt werden. Dabei soll der «Polymerwerkstoff» als Ergänzung und Bereicherung der bis heute bekannten Werkstoffe wie Metalle, Holz, usw. verstanden werden und nicht als deren Verdränger.

# Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Vorwort.....   | 3  |
| Einführung.....                                      | 4  |
| Die Geschichte des Kunststoffs.....                  | 12 |
| Alles begann im Jahre 1860.....                      | 12 |
| Geschichte der Polymere in Form einer Zeittafel..... | 13 |
| Werkstoffbegriffe.....                               | 15 |
| Einteilung der Werkstoffe.....                       | 15 |
| Einteilung der Polymerwerkstoffe.....                | 16 |
| Aufbau der Polymerwerkstoffe.....                    | 17 |
| Aufbau der Thermoplaste.....                         | 17 |
| Aufbau der thermoplastischen Elastomere.....         | 17 |
| Aufbau der Duromere.....                             | 18 |
| Aufbau der Elastomere.....                           | 19 |
| Aufbau und Herstellung der Polymerwerkstoffe.....    | 19 |
| Polyreaktion.....                                    | 20 |
| Polymerisation.....                                  | 20 |
| Polykondensation.....                                | 21 |
| Polyaddition.....                                    | 21 |
| Polymerisationsarten.....                            | 22 |
| Polymerblends.....                                   | 23 |
| Technische Biopolymere.....                          | 23 |
| Allgemeines.....                                     | 23 |
| Was sind Biopolymere?.....                           | 24 |
| Abbaubare petrobasierte Biopolymere.....             | 25 |
| Abbaubare biobasierte Biopolymere.....               | 25 |
| Nicht abbaubare biobasierte Biopolymere.....         | 25 |
| Biologische Abbaubarkeit und Kompostierbarkeit.....  | 26 |
| Oxoabbaubarkeit.....                                 | 27 |
| Rohstoffbedarf zur Biopolymererzeugung.....          | 28 |
| Makromolekulare Stoffe.....                          | 33 |
| Art der beteiligten Atome.....                       | 33 |
| Anordnung der beteiligten Atome.....                 | 33 |
| Gestalt der Makromoleküle.....                       | 34 |
| Grösse der Makromoleküle.....                        | 35 |
| Ordnung der Makromoleküle untereinander.....         | 35 |
| Vom Kautschuk zum Elastomer.....                     | 36 |
| Mischungsbegriff.....                                | 36 |
| Zusammensetzung des Werkstoffes Elastomer.....       | 38 |

|  |    |
|--|----|
| Kautschukarten .....   | 38 |
| Glasübergangstemperaturen .....  | 38 |
| Zuschlagstoffe für Kautschuk .....                                       | 39 |
| Mastifiziermittel .....  | 39 |
| Vulkanisation oder Vernetzung .....                                      | 39 |
| Vernetzungschemikalien .....   | 40 |
| Vernetzungsmittel.....   | 40 |
| Wichtigste Vulkanisationsarten.....                                      | 41 |
| Vulkanisationsgrad .....   | 41 |
| Vulkanisationsstadien.....   | 41 |
| Vulkanisationsbeschleuniger .....  | 42 |
| Vulkanisationsverzögerer .....   | 43 |
| Aktive und inaktive Füllstoffe .....                                     | 43 |
| Weichmacher .....  | 44 |
| Klebrigmacher .....  | 44 |
| Faktis .....   | 44 |
| Alterungsschutzmittel .....  | 44 |
| Trennmittel .....  | 44 |
| Treibmittel .....  | 45 |
| Haftvermittler.....  | 45 |
| Verstärkungsstoffe .....   | 45 |
| Gewebe.....  | 45 |
| Metallcord.....  | 45 |
| Latex-Chemikalien.....   | 45 |
| Verarbeitung der Polymerwerkstoffe.....                                  | 46 |
| Verarbeitung Thermoplaste, thermoplastische Elastomere und Duromere..... | 46 |
| Verarbeitungsverfahren .....   | 47 |
| Formgebung durch Extrusion .....   | 48 |
| Plattenextrusion.....  | 49 |
| Rohr- oder Profilextrusion.....  | 49 |
| Folienextrusion .....  | 49 |
| Blasfolienextrusion .....  | 49 |
| Hohlkörperblasen Extrusionsblasen .....                                  | 50 |
| Kabelummantelung .....   | 50 |
| Formgebung durch Kalandrieren .....                                      | 51 |
| Formgebung durch Spritzgiessen.....                                      | 51 |
| Formgebung durch Pressen .....   | 53 |
| Elastomerverarbeitung.....   | 53 |
| Grundsätzliches.....   | 53 |
| Herstellung verarbeitungsfähiger Kautschukmischungen .....               | 54 |

|  |    |
|--|----|
| Arbeiten mit dem Innenmischer .....  | 54 |
| Arbeiten auf dem Walzwerk.....   | 55 |
| Formgebung von Kautschukmischungen.....  | 56 |
| Formgebung durch Extrusion .....   | 57 |
| Formgebung durch Spritzgiessen (Injektion) .....                                 | 57 |
| Formgebung durch Kalandrieren .....  | 57 |
| 3D-Druck .....   | 58 |
| Übersicht .....  | 58 |
| Generative Fertigungsverfahren – Schichtbauverfahren .....                       | 58 |
| Laser-Stereolithografie (LS) .....   | 58 |
| Polymerdruckverfahren und Thermojet-Drucken (Polymerjetting).....                | 60 |
| Digital Light Processing/Lampen-Masken-Verfahren .....                           | 60 |
| Lasersintern/Selektives Lasersintern (LS – SLS).....                             | 61 |
| Elektronenstrahl-Schmelzen.....  | 62 |
| Extrusion/Fused Layer Modeling .....   | 62 |
| Fused Depositing Modeling (FDM).....   | 63 |
| Pulver-Binder-Verfahren/Dreidimensionales Drucken (Drop On Powder Process) ..... | 63 |
| „Three Dimensional Printing“ – Voxeljet .....                                    | 64 |
| Layer Laminate Manufacturing (LLM).....  | 64 |
| Layer Laminate Manufacturing, Paper Lamination – MCOR.....                       | 64 |
| Layer Laminate Manufacturing, Laminate Printer .....                             | 64 |
| Bioplotter.....  | 65 |
| Schäumen von Polymerwerkstoffen .....  | 66 |
| Geschäumte Thermoplaste, thermoplastische Elastomere und Duromere.....           | 66 |
| Geschäumte Elastomere .....  | 67 |
| Weiterverarbeitungsverfahren .....   | 68 |
| Warmformen von thermoplastischem Halbzeug.....                                   | 68 |
| Abkanten und Biegen .....  | 69 |
| Recken und Schrumpfen.....   | 69 |
| Formstanzen .....  | 69 |
| Prägen .....   | 69 |
| Mechanisches Tiefziehen.....   | 69 |
| Blasen in den freien Raum .....  | 70 |
| Blasen in Negativform .....  | 70 |
| Mechanische Bearbeitung von Polymerwerkstoffen .....                             | 70 |
| Grundsätzliches zur spangebenden Bearbeitung von Polymeren.....                  | 71 |
| Bearbeitung von Elastomeren.....   | 72 |
| Oberflächenbehandlung.....   | 73 |
| Fügemethoden.....  | 74 |
| Schweissen von Thermoplasten .....   | 74 |

|  |    |
|--|----|
| Wärmgasschweissen .....                                  | 75 |
| Heizelementschweissen .....                              | 75 |
| Hochfrequenzschweissen.....                              | 76 |
| Ultraschallschweissen .....                              | 76 |
| Reibungsschweissen.....                                  | 77 |
| Kleben von Thermoplasten und Duromeren.....              | 77 |
| Prinzip des Klebens.....                                 | 78 |
| Klebstoffe .....   | 78 |
| Lösungsmittel als Klebstoff.....                         | 78 |
| Reaktionsklebstoff .....                                 | 79 |
| Konstruktion von Klebeverbindungen .....                 | 79 |
| Behandlung der Fügeflächen .....                         | 80 |
| Klebtechnik.....   | 80 |
| Umwelt- und Einsatzbedingungen .....                     | 80 |
| Kleben von Elastomeren.....                              | 80 |
| Allgemeines.....   | 80 |
| Haftmechanismus.....                                     | 81 |
| Vorbehandlung der Klebflächen .....                      | 81 |
| Eigenschaften der Polymerwerkstoffe .....                | 82 |
| Verformungsverhalten .....                               | 83 |
| Denkmodell für viskoelastisches Verhalten.....           | 84 |
| Physikalische Eigenschaften.....                         | 85 |
| Allgemeines.....   | 85 |
| Dichte.....  | 85 |
| Dämpfung.....  | 85 |
| Innere Dämpfung bei Elastomeren .....                    | 86 |
| Spannungs-Dehnungsverhalten .....                        | 86 |
| Elastizitätsmodul .....                                  | 88 |
| Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Elastomere .....         | 88 |
| Verhalten bei Schlagbeanspruchung .....                  | 89 |
| Härte .....  | 90 |
| Abriebfestigkeit.....                                    | 91 |
| Abriebfestigkeit bei Elastomeren .....                   | 92 |
| Besonderes Physikalisches Verhalten der Elastomere ..... | 92 |
| Kompressionsverhalten .....                              | 92 |
| Druckverformungsrest .....                               | 93 |
| Zugverformungsrest .....                                 | 94 |
| Rückprall-Elastizität.....                               | 94 |
| Reibungskoeffizient.....                                 | 95 |
| Thermische Eigenschaften.....                            | 95 |



|  |     |
|--|-----|
| Wärmedehnung.....  | 95  |
| Wärmekapazität .....   | 96  |
| Wärmeleitfähigkeit.....  | 96  |
| Thermische Eigenschaften der Elastomere .....                        | 97  |
| Langzeitverhalten der Polymerwerkstoffe .....                        | 98  |
| Alterung von Polymerwerkstoffen.....                                 | 99  |
| Alterung.....  | 100 |
| Wärmebeständigkeit.....  | 101 |
| Witterungsbeständigkeit .....  | 103 |
| Stabilisierung von Polymerwerkstoffen .....                          | 105 |
| Alterungsprozess bei Elastomeren .....                               | 106 |
| Chemische Beständigkeit.....   | 106 |
| Besonderheiten der chemischen Beständigkeit von Elastomeren.....     | 108 |
| Gasdurchlässigkeit (Permeation).....                                 | 109 |
| Gasdurchlässigkeit (Permeation) bei Elastomeren .....                | 110 |
| Brandverhalten .....   | 111 |
| Brandverhalten der Elastomere .....                                  | 112 |
| Elastomere im Kontakt mit Metallen, Kunststoffen und Lacken .....    | 113 |
| Kontakt mit Metallen.....  | 113 |
| Kontakt mit Kunststoffen und Lacken .....                            | 113 |
| Lagerung und Reinigung von Elastomerartikeln .....                   | 114 |
| Grundsätzliches.....   | 114 |
| Lagerungsvorschriften .....  | 114 |
| Temperatur.....  | 114 |
| Feuchtigkeit.....  | 114 |
| Licht .....  | 114 |
| Sauerstoff und Ozon .....  | 114 |
| Deformation.....   | 114 |
| Kontakt mit Flüssigkeiten.....                                       | 115 |
| Kontakt mit diversen Festkörpern .....                               | 115 |
| Behälter und Verpackungsmaterial.....                                | 115 |
| Pudermittel .....  | 115 |
| Erneuerung des Lagers .....  | 115 |
| Reinigungsvorschriften.....  | 115 |
| Toleranzen, Passungen und Oberflächengüte in der Polymertechnik..... | 116 |
| Allgemeines .....  | 116 |
| Auswahl relevanter Normen.....                                       | 117 |
| Grundnormen .....  | 117 |
| Maschinenelemente .....  | 117 |
| Tolerierung von Teilen aus Kunststoffen .....                        | 117 |

|  |     |
|--|-----|
| Rohre aus Kunststoffen .....   | 118 |
| Oberflächengüte .....  | 118 |
| Recycling und Entsorgung von Polymerwerkstoffen .....                    | 119 |
| Einführung in das Recycling und die Entsorgung .....                     | 119 |
| Innerbetriebliches Recycling .....                                       | 120 |
| Einsatz von Recyclat im Spritzgiessprozess .....                         | 120 |
| Qualitätssicherung im Spritzgiessprozess .....                           | 122 |
| Recycling von Thermoplasten .....  | 123 |
| Einleitung .....   | 123 |
| Aufbereitung von gemischten Thermoplastreststoffen .....                 | 124 |
| Verbesserung von Recyclat durch mineralische Füllstoffe .....            | 125 |
| Verbesserung von Recyclat durch Compatibilizer .....                     | 125 |
| Einsatz von Compatibilizern an einem praktischen Beispiel .....          | 126 |
| Recycling gebrauchter Produkte .....                                     | 128 |
| Ausblick .....   | 130 |
| Recycling von Duromeren .....  | 130 |
| Recycling von Elastomeren .....  | 131 |
| Allgemeines .....  | 131 |
| Produkte aus Gummigranulaten .....                                       | 133 |
| Bindemittel Polyurethan .....  | 133 |
| Fugenübergänge für Brücken, Parkdecks und Industrieböden .....           | 133 |
| Elemente für Lärmschutzwände .....                                       | 134 |
| Bindemittel Kautschuk .....  | 135 |
| Gummigranulat aus Alt Pneu in bituminösen Baustoffen .....               | 135 |
| Recycling von Faserverbundwerkstoffen mit polymerer Matrix .....         | 135 |
| Energetische Verwertung von Polymeren .....                              | 136 |
| Einfluss der Kunststoffe auf den Verbrennungsprozess .....               | 136 |
| Chemische Wiederverwertung von Polymeren .....                           | 137 |
| Pyrolyseverfahren .....  | 137 |
| Hydrierung .....   | 138 |
| Vergasung von Altkunststoffen .....                                      | 139 |
| Festbettdruckvergasung .....   | 139 |
| Genormte Kurzzeichen der Polymerwerkstoffe .....                         | 141 |
| Kurzzeichen der Thermoplaste und Duromere nach DIN EN ISO 1043-1 .....   | 141 |
| Kurzzeichen der thermoplastischen Elastomere nach DIN EN ISO 18064 ..... | 144 |
| Kurzzeichen der Elastomere nach DIN ISO 1629 .....                       | 146 |
| Handelsnamen .....   | 148 |
| Literaturangaben (Quellen) .....   | 150 |
| Grundlagen .....   | 150 |
| Eigenschaften, Werkstofftabellen usw. ....                               | 150 |

|   |     |
|---|-----|
| Verarbeitung von Polymerwerkstoffen ..... | 151 |
| Prüfung von Polymerwerkstoffen .....      | 151 |
| Biopolymere .....                         | 151 |
| Diverses .....                            | 151 |