

Kunststoffe
im
Modell- und Formenbau



Inhalt

Inhalt.....	2
Einführung.....	3
Kunststoffe und Chemie.....	4
Epoxidharze.....	6
Polyesterharze.....	8
Polyurethanharze.....	9
Silikone.....	11
Eigenschaften und Prüfung.....	13
Modellbauwerkstoffe.....	16
Rapid Prototyping.....	17
Klebstoffe.....	19

Einführung

Der Modell- und Formenbau für die Herstellung von Gusserzeugnissen ist ein Handwerk mit einer sehr langen Tradition. Schon in der Antike wurden Skulpturen aus Metallen, vorwiegend aus Kupfer und Bronze, gegossen. Später, im Mittelalter, stieg der Bedarf an Gießereierzeugnissen stark an. Es wurden beispielsweise große Mengen an Geschützen hergestellt, wobei zu dieser Zeit noch keine Trennung zwischen dem Gießer und dem Modell- bzw. Formbauer bestand. Wesentliche Werkstoffe der antiken Modellbauer waren Wachs, Holz und Sand. Auch einfache Bindemittel für die Fertigung von Sandformen gab es zu dieser Zeit bereits in Form von „Gummi Arabicum“ und Eiweiß. Zusammengefasst hat der Gießereimodellbau eine etwa 5.000 jährige Geschichte.

In der heutigen Zeit ist der industrielle Modellbau ein von der Gießereitechnik abgetrenntes und eigenständiges Handwerk. Natürlich besteht aber nach wie vor oft eine räumliche Nähe. Der Modell- und Formenbau basiert dabei zum einen auf den Holzberufen, weshalb man ihn in früheren Zeiten auch Modellschreiner nannte. Zum anderen ist Basis die Metallbearbeitung, was die ältere Bezeichnung Modellschlosser deutlich wieder spiegelt. Der Modell- und Formenbau lässt sich heute in zwei Hauptgruppen unterteilen: den Produktionsmodellbau, der sich wiederum in eine Vielzahl von einzelnen Spezialgebieten unterteilt, und den Anschauungsmodellbau.

Neben der rein manuellen Bearbeitung von Werkstoffen und dem Duplizieren von Urmodellen, ist die CNC gesteuerte automatische Bearbeitung von Blockmaterialien heute weit verbreitet und praktisch Stand der Technik. Aber die Abformung von Modellen mit gießbaren Kunststoffen, oder auch der Auftrag von Oberflächenharzen sind nach wie vor wichtige Techniken. Bei den zuvor genannten Techniken sind die sich daraus ergebenden Anforderungen durchaus deutlich unterschiedlich, was sich auch bei den verwendeten Kunststoff-Systemen wieder spiegelt. So gibt es neben zahlreichen Pasten und Laminierharzen auch eine Vielzahl an Gießharzen und Abformmassen. Auch Modellbauwerkstoffe gibt es mit sehr unterschiedlichen Qualitäten und mit Raumgewichten von ca. $0,05 \text{ g/cm}^3$ (Leichtschäumblöcke) bis etwa $1,7 \text{ g/cm}^3$.

Der Gießereimodellbau benötigt Kunststoffe, die z.T. in großen Volumen vergossen werden können. Hier ist im Wesentlichen eine hohe Druckfestigkeit gefragt. Für die verschiedenen Hilfseinrichtungen können die Anforderungen aber wiederum ganz anderer Art sein, beispielsweise kann hohe Schlagzähigkeit oder aber auch ein besonders geringer Schwund wichtig sein. Im Bereich der Fertigung von Kernkästen ist hingegen eine außerordentlich hohe Abriebfestigkeit an der Oberfläche gefragt. Zudem sollen die Kunststoffe besonders schlagfest sein. Auch die Verarbeitungszeiten unterscheiden sich erheblich. Bei der Herstellung von Karosseriemodellen gilt es geeignete Kunststoffe für Klopfformen auszuwählen und Laminierer legen besonderen Wert auf gute Benetzung von Fasern und wünschen hohe Festigkeiten in dünnen Schichten.

All diese verschiedenen Anforderungen lassen sich natürlich nicht mit einem universellen Kunststoff erzielen. Aus diesem Grund gibt es zum einen Kunststoffe unterschiedlicher chemischer Basis und zudem in den einzelnen Gruppen auch deutlich unterschiedliche Qualitäten. Hier gilt es immer eine ausgewogene Balance zwischen guten Eigenschaften und einem akzeptablen Preis zu erzielen. Grundsätzlich wird man für ein und dieselbe Anwendung immer mehrere Systeme finden, die zum Teil auch deutlich unterschiedliche Preise haben. Aber eben auch erheblich Unterschiede in der Qualität, was sich oft erst am Endprodukt zeigt.

Kunststoffe und Chemie

Die chemische Industrie hat in den letzten ca. 40 Jahren eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme entwickelt, die alle im Modell- und Formenbau ihre Bedeutung haben. Im Wesentlichen muss man dabei unterscheiden, ob der Anwender diese Kunststoffe vor der Arbeit selbst vermischen muss, oder aber ob es sich um fertig formulierte Systeme handelt. Im nachfolgenden Text werden nur die Systeme behandelt, die vom Anwender vor der Verarbeitung selbst aus wenigstens zwei, in der Regel flüssigen Komponenten angemischt werden. Diese Kunststoffsysteme lassen sich im Wesentlichen in folgende Gruppen unterteilen:

- Epoxidharze
- Polyesterharze
- Polyurethanharze
- Silikone

So unterschiedlich die Eigenschaften der Kunststoffe im ausreagierten Zustand sind, so unterschiedlich ist auch die chemische Reaktion, die zu dem Kunststoff führt.

Alle hier genannten Systeme bestehen in der Regel aus zwei flüssigen Komponenten, wovon eine die Harzkomponente und die andere die Härterkomponente ist. Nur bei Silikonen spricht man aufgrund der gummielastischen Eigenschaft des Endprodukts nicht von Härter, sondern von Vernetzer. Um die gewünschte End Eigenschaft zu erhalten ist das Mischungsverhältnis der beiden Komponenten vom Hersteller vorgegeben. Auch die Abbinde- oder Topfzeit wird angegeben. Diese ist aber meist von der Menge, d.h. der Ansatzgröße und von der Umgebungstemperatur abhängig. Grundsätzlich kann man sagen, dass die Reaktion mit dem Härter (Vernetzer) umso schneller abläuft, je wärmer es ist. Entsprechend verkürzt sich auch die Topfzeit.

Die chemische Reaktion die zwischen Härter und Harz abläuft ist eine so genannte Polymerisationsreaktion und gehört in das Gebiet der organischen Chemie. Das ist der Oberbegriff des Bereichs der Chemie, der sich mit den Stoffen beschäftigt, die auf der Basis von Kohlenstoffatomen (C) aufgebaut sind. Diese Stoffe haben Moleküle, also die kleinsten Baugruppen eines Stoffes, gänzlich unterschiedlicher Bauart. Moleküle werden unter anderem nach ihrer Bauart unterschieden:

- aliphatische Kohlenwasserstoffe
- aromatische Kohlenwasserstoffe

Aliphatische Kohlenwasserstoffe sind organische verzweigte oder unverzweigte, ketten- oder ringförmige Moleküle. Der Begriff kommt aus dem Griechischen *aleiphar* = fettig. Kurz gesagt sind dies alle Moleküle, die nicht aromatisch sind. Aromatische Kohlenwasserstoffe hingegen basieren in ihrer Struktur auf dem Benzolring, einem Ring aus sechs Kohlenstoffatomen, die mit je abwechselnd drei Doppel- und Einfachbindungen verbunden sind (konjugierte Doppelbindungen).

Ein weiteres wichtiges Unterscheidungsmerkmal von Molekülen sind die funktionellen Gruppen. Das sind die bei der Reaktion mit anderen Stoffen aktiven Stellen im Molekül. Bei Harzen und Härtern sind an der Reaktion nur die funktionellen Gruppen beteiligt, wogegen der Rest des Moleküls nicht verändert wird. Wohl aber hat er einen Einfluss auf die

Reaktionsgeschwindigkeit und auf den Charakter der der Komponente. Wichtige funktionelle Gruppen sind beispielsweise die OH-Gruppe der Alkohole, die COOH-Gruppe der organischen Säuren (Carbonsäuren) und die NH₂-Gruppe der (primären) Amine. Entsprechend ihrem Charakter können diese Gruppen miteinander eine chemische Reaktion eingehen. Neben der Reaktion der funktionellen Gruppen besteht auch noch die Möglichkeit einer Reaktion an einer Doppel- oder Dreifachbindung in einem Molekül.

Die Reaktion zwischen Harz und Härter führt bei Epoxiden, Polyestern und Polyurethanen grundsätzlich zu duromeren Werkstoffen. Kennzeichnend hierfür ist, im Gegensatz zu den Thermoplasten, dass die Reaktionsprodukte durch Wärme nicht mehr aufschmelzbar sind. Dies hat seinen Grund in der räumlichen Vernetzung der kettenförmigen Makromoleküle. Ähnlich verhält es sich mit Silikonen, die ebenfalls durch Wärme nicht mehr aufschmelzbar sind, aber aufgrund der elastischen Eigenschaften zu den Elastomeren gehören. Auch Silikone sind räumlich vernetzt.

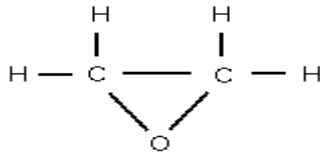
Die Reaktion von Harz und Härter ist eine Polymerisationsreaktion. Unterschieden wird bei Polymerisationen zwischen Polyadditionsreaktionen und Polykondensationsreaktionen. Dies ist für den Formenbau von entscheidender Bedeutung. Bei einer Polyadditionsreaktion entsteht bei der Reaktion grundsätzlich kein Spalt- oder Reaktionsnebenprodukt. Aus der Form kann also kein Reaktionsprodukt entweichen und sie kann folglich auch weitgehend geschlossen gebaut werden. Bei Polykondensationsreaktionen entsteht bei der Reaktion zwischen Harz und Härter (Vernetzer) dagegen neben dem gewünschten Reaktionsprodukt noch ein weiteres Nebenprodukt. Dies ist meist flüchtig oder leichtflüchtig, weshalb man auch von Kondensat spricht. Bei Veresterungsreaktionen ist dieses Kondensat Wasser. Bei Kondensations vernetzenden Silikonen sind dies in der Regel kurzkettige Alkohole. Die bei der Reaktion entstehenden Kondensate müssen beim Formbau berücksichtigt werden.

Bei fast allen chemischen Reaktionen wird Energie in Form von Wärme frei. Diese freiwerdende Wärme nennt man Exothermie. Zudem ist für den Start einer Reaktion eine bestimmte Energie (= Wärme) erforderlich, ohne die eine Reaktion nicht starten würde. Die Aktivierung der Reaktion kann durch Zugabe von geeigneten Katalysatoren günstig beeinflusst werden. So kann sowohl die Starttemperatur abgesenkt, als auch die Reaktionszeit verkürzt werden. Damit ist aber auch die Gefahr verbunden, dass sich im System eine zu große Wärme entwickelt. Deshalb müssen die Reaktionszeiten auf die Ansatzgröße abgestimmt werden. So wie es Katalysatoren gibt, stellt die Chemie auch Inhibitoren zur Verfügung, die die Reaktionszeit abbremsen können. Durch solche einfach zu dosierenden Topfzeitverlängerer kann ein eigentlich schnelles System auch für den Verguss in größeren Volumen eingesetzt werden.

Neben der Verwendung von Katalysatoren und Inhibitoren haben auch die oft in Gießsystemen eingesetzten Füllstoffe einen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit. In den allermeisten Fällen wirken Füllstoffe Reaktions verlangsamend. Die Reaktionspartner haben es schlicht schwerer zueinander zu finden. Allerdings gibt es auch hier Ausnahmen. So wirkt eine Alkali angereicherte Oberfläche von Aluminiumhydroxid (ATH) beispielsweise bei der Verwendung in Polyurethansystemen katalytisch. Feuchte Füllstoffe führen zu unerwünschtem „Wachsen“ der Gießlinge, was an der Reaktion des Isocyanats mit dem Wasser unter Bildung von Kohlendioxid liegt. Schwermetallhaltige Farbpigmente unterbinden eine Vernetzung von Additions vernetzenden Silikonen gänzlich. Grundsätzlich ist vor der Verwendung von Füllstoffen die Eignung zu prüfen. In der Regel wird dies von den Lieferanten aber bereits getan.

Epoxidharze

Epoxidharze sind organische Flüssigkeiten von mehr oder weniger hoher Viskosität, die im Durchschnitt zumeist annähernd zwei nahezu endständige (isolierte) Epoxid-Gruppen pro Molekül enthalten und mit geeigneten Härtern zu Duroplasten reagieren. Epoxide werden im Wesentlichen nach drei Methoden hergestellt: Addition von Sauerstoff an Olefine, Chlorwasserstoffabspaltung aus Chlorhydrinen oder die Umsetzung von reaktiven Verbindungen mit Epichlorhydrin. Epoxidharze haben im Modell- und Formenbau die längste Tradition und werden bereits seit den 1960'er Jahren eingesetzt. Die wichtigste funktionelle Gruppe aller Epoxide ist die Epoxid-Gruppe, die auch Ethylenoxid-Gruppe genannt wird:



Der mittlere Anteil an Epoxid-Gruppen je Molekül ist die wichtigste Kenngröße für die Berechnung des genauen Mischungsverhältnis mit dem jeweiligen Härter, von dem selbstverständlich auch die so genannte Funktionalität bekannt sein muss. Diese Funktionalität kann als EP-Wert (je kg) oder auch als EW angegeben werden. Unterschieden werden Epoxidharze auch in Bisphenol A oder Bisphenol F Harze. Die chemische Basis ist für einige Eigenschaften verantwortlich. Wesentlich ist hier die Empfindlichkeit von Bisphenol A Harzen gegenüber Kälte, die zu Kristallisation führt. So genannte AF-Harze sind hingegen unkritisch bezüglich der Verwendung und Lagerung bei niedrigen Temperaturen.

Die Vernetzung zu Makromolekülen erfolgt mit verschiedenen Härtern, bei denen nach kalthärtenden und heißhärtenden Verfahren unterschieden wird. Es stehen zum einen Carbonsäureanhydride zur Verfügung. Weit verbreiteter ist aber die Verwendung von Di- und Polyaminhärtern, bzw. von Amiden. Wichtig ist bei Verwendung im Modell- und Formenbau, dass der Härter die Reaktion bereits bei Raumtemperatur startet. Die Reaktion ist eine Polyadditionsreaktion. Die Reaktionsgeschwindigkeit lässt sich durch Zugabe von geeigneten Katalysatoren oder Inhibitoren stark beeinflussen. Zudem wirkt Wärme Reaktions beschleunigend. Polymerisationen von Epoxidharzen sind immer exotherm.

Außer durch die chemische Zusammensetzung können die Eigenschaften der Epoxide durch Zugabe von Füllstoffen, Weichmachern und anderen Modifizierungsmitteln erheblich beeinflusst werden. Dies machen sich die Formulierer von Epoxidharz-Systemen zu nutze. Auf Basis einiger weniger Harze lassen sich so viele spezielle Harze herstellen. Natürlich können Zuschlagsstoffe auch noch vom Anwender zugesetzt werden. Hierbei ist aber der Einfluss der Zuschlagsstoffe zu prüfen. Alkohole, Phenole und Carbonsäuren wirken dabei beschleunigend. Ketone und aromatische Kohlenwasserstoffe wirken dagegen verzögernd.

Sofort nach Zugabe des Härters steigt die Viskosität der Mischung an. Nach einer bestimmten Zeit ist die Mischung nicht mehr gießbar und somit die Topfzeit erreicht. Im Vergleich zu Säureanhydriden ist die Reaktion mit Aminen deutlich schneller und exothermer. Nach der Gelierung klingt die Exothermie wieder deutlich ab. Die Endeigenschaften sind aber meist erst nach mehreren Tagen erreicht. Deutlich verkürzt werden kann diese Zeit durch Temperung. Durch ein geeignetes, in der Regel vom Hersteller vorgegebenes Temperprogramm können die Eigenschaften des Endproduktes oft auch noch deutlich gesteigert werden.

Eine unerwünschte Nebenreaktion der oft verwendeten Amin-Härter ist die Reaktion mit der in der Luft enthaltenen Feuchtigkeit. Hierbei bildet sich so genanntes Carbamat. Dies ist zwar nur auf der Oberfläche, jedoch sehr unangenehm, da die Oberfläche klebrig bleibt. Verhindern kann man diese Nebenreaktion durch Abdecken, z.B. mit Abreißgewebe. Neuere Härter ermöglichen mittlerweile eine Carbamat freie Aushärtung. Allerdings sind diese Systeme in aller Regel teurer, ohne über bessere mechanische Eigenschaften zu verfügen.

Epoxidharze und insbesondere die verwendeten Härter können aufgrund ihrer Reaktivität bei Kontakt zu ernsthaften Schädigungen der betroffenen Körperstellen führen. Dabei zeigen die Härter in der Regel eine Ätzwirkung und können betroffenes Gewebe zerstören. Neben der akuten Gefährdung, der man relativ leicht durch geeignete Schutzmittel vorbeugt, kann der regelmäßige Kontakt mit Epoxiden und den Härtern aber auch allergische Reaktionen hervorrufen. Dies sollte schon früh durch entsprechende Arbeitshygiene verhindert werden, da eine Allergie im Allgemeinen nicht heilbar ist.

Epoxidharze ergeben im polymerisierten Zustand in der Regel harte bis sehr harte, zumeist recht spröde Werkstoffe. Der Härtegrad wird allgemein durch Zuschlagstoffe eingestellt. In verschiedenen Formulierungen werden Epoxidharz-Systeme als Laminierharze, als Bindemittel für z.B. Hinterfüllungen und in Verbindung mit ausgewählten Füllstoffen als Vergussmassen eingesetzt. Thixotropierte Vergussmassen setzt man auch als dünn aufzutragende Oberflächenpasten ein. Darüber hinaus werden Epoxide auch im Beschichtungssektor, im Bautenschutz, als Klebstoffe und als Einbettungsmasse eingesetzt. Zusätzlich zu den Füllstoffen sind die Zugabe von weiteren Hilfsstoffen, wie Netz- und Dispergiermittel, Verlaufshilfsmittel, sowie Entschäumer und Entlüfter für fertig formulierte Systeme unerlässlich, damit der Anwender die Harze einsetzen kann.

Die sehr gute Chemikalienbeständigkeit der Epoxidharzformstoffe und -lamine gegenüber Säuren hat zur Anwendung in chemischen Anlagen geführt. Auch für Auskleidungen von Pumpen in der chemischen Industrie und im Kraftwerksbereich sind Epoxide bestens geeignet. Ein weiteres Anwendungsgebiet sind Schaumstoffe. Es finden hauptsächlich Hartschäume auf Epoxidharzbasis Anwendung. Sie sind besonders zur nachträglichen Ausschäumung von Hohlräumen in Anlagen aller Art geeignet, wobei sich ihre gute Haftfestigkeit auf fast allen Werkstoffen vorteilhaft auswirkt.

Epoxidharz-Lamine weisen gegenüber Polyester-Laminaten einige zum Teil sehr deutliche Vorteile auf. So ist die Haftung auf der Faser deutlich besser (siehe Kleber) und es ergibt sich somit eine wesentlich bessere Ausnutzung der Festigkeit der Faser, und somit des gesamten Bauteils. Bei der Aushärtung ist die Schrumpfung wesentlich geringer und es entsteht ein Bauteil mit besserer Dimensionsstabilität und Präzision. Epoxidharzformstoffe weisen hohe Wärmeformbeständigkeiten, Dauerwärmestandfestigkeiten und gute Alterungsstabilität auf. Bei der Verarbeitung ist die geringere Geruchsbelastigung sicher vorteilhaft gegenüber ungesättigten Polyestern (Styrol).

Den zahlreichen Vorteilen stehen den weit verbreiteten ungesättigten Polyesterharzen auch einige Nachteile gegenüber. Hier ist an erster Stelle sicher der höhere Preis zu nennen. Aber auch verarbeitungstechnisch ergeben sich einige Nachteile. So ist das Mischungsverhältnis genau einzuhalten, da sonst nicht die gewünschten Endigenschaften erreicht werden. Die Gebrauchsdauer der Harzmasse ist kürzer und die Härtung erfordert mehr Zeit, sowie höhere Temperaturen.

Polyesterharze

Ungesättigte Polyesterharze, kurz auch UP(E)-Harze, sind Reaktionsprodukte aus gesättigten, also keine Doppelbindungen enthaltenden, und ungesättigten, Doppelbindungen enthaltenden Dicarbonsäuren und Diolen. Die in den Molekülketten enthaltenen Doppelbindungen stehen für eine Polymerisationsreaktion zur Verfügung. Dies geschieht in diesem Fall mit einem weiteren Stoff, der ebenfalls über eine Doppelbindung verfügt. Weit verbreitet ist hier die Verwendung von Styrol. Styrol ist somit ein Comonomer und das Reaktionsprodukt ist demzufolge ein Copolymer. Der ungesättigte Polyester wird dabei in dem Styrol gelöst, um für die Verarbeitung entsprechend flüssig zu sein. Der Styrolgehalt der fertigen Formulierung liegt meist im Bereich von 30 – 40%.

Im Gegensatz zu der Reaktion bei z.B. Epoxidharzen erfolgt die Polymerisation aber nicht dergestalt, dass sich Härter-Moleküle am Harz-Molekül anlagern, sondern hier wird die Reaktion durch den Härter nur angestoßen. Üblicherweise werden für diese Anstoßreaktion organische Peroxide verwendet, die sich zu Beginn der Reaktion durch Wärme oder geeignete Katalysatoren in so genannte Radikale aufspalten. Die mehrfach ungesättigte Polyesterharz-Kette reagiert dabei mit dem ungesättigten Comonomeren (Styrol) und wird so räumlich vernetzt. Als Reaktionsbeschleuniger haben organische Cobalt-Salze und Amine die größte praktische Bedeutung erlangt. Allerdings aktivieren diese Salze nur ganz bestimmte Peroxid-Klassen. Die wichtigsten Härter für die Kalthärtung sind Methylethylketonperoxid oder Dibenzoylperoxid. Bei Heißhärtung wird oft tert.-Butylperoxybenzoat eingesetzt. Oft kommen auch Härtergemische zum Einsatz. So ist ein angepasster Härterungsverlauf darstellbar.

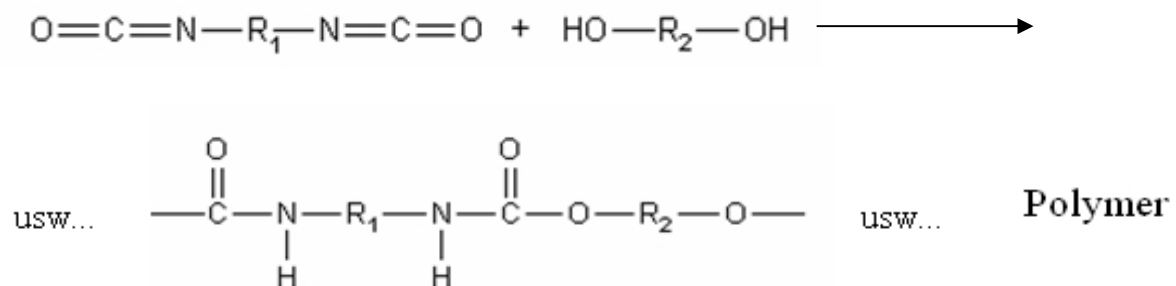
Ist hingegen eine Inhibierung erwünscht, so empfiehlt sich die Verwendung von gängigen Inhibitoren, die die Topfzeit, z.B. zur längeren Lagerfähigkeit des fertigen Harzgemisches, erheblich verlängern können. Es handelt sich hierbei um Substanzen, die eine unerwünschte Polymerisation der Monomere verhindern. Dies können Chinone oder ein- oder mehrwertige Phenole sein. Die Verarbeitungs- und Härterzeit wird, im Gegensatz zu z.B. Epoxiden, durch die Zugabemenge an Härter gesteuert. Bei Zugabe von wenig Härter (z.B. 0,5%) ergibt sich eine langsame Aushärtung. So ist es möglich auch dickere Schichten in einem Arbeitsgang zu fertigen, ohne eine zu hohe Exothermie zu haben.

Polyesterharze sind in der Herstellung von Glasfaser-Laminaten weit verbreitet. Dies hat sicher seinen wesentlichen Grund in den günstigen Preisen, die für ungesättigte Polyesterharze gezahlt werden müssen. Auf der anderen Seite sind die Eigenschaften der Lamine zumindest den Ansprüchen entsprechend, so dass die Verwendung von höherwertigen Laminierharzen nicht erforderlich ist. Auch anwendungstechnisch ist die Verwendung von Polyesterharzen recht einfach, da kein exaktes Mischungsverhältnis eingehalten werden muss. Ein weiteres interessantes Anwendungsgebiet ist die Einbettung von Objekten in Polyesterharz. Hierzu müssen die verwendeten Harze allerdings absolut UV-beständig sein, da sonst im Laufe der Zeit eine Verfärbung – Gelbstich – auftritt.

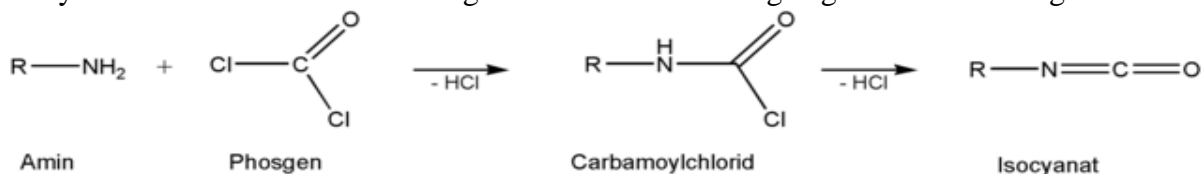
Ein großer Nachteil bei der Verwendung von ungesättigten Polyesterharzen ist der sehr intensive Styrol-Geruch. Zudem ist Styrol auch Gesundheits gefährdend und leicht entzündbar. Die mit der Verwendung verbundenen Gefahren lassen sich durch organisatorische Maßnahmen und persönliche Schutzausrüstung zwar minimieren, allerdings ist in jedem Fall eine entsprechende Abluftanlage erforderlich.

Polyurethane

Kaum ein Werkstoff ist heute so Vielseitig wie es die Gruppe der Polyurethane ist. Erfunden wurden die Polyurethane im Jahr 1937 von Otto Bayer bei der früheren Bayer AG (heute Bayer Material Science). Es lassen sich sowohl weiche, gummiartige Elastomere herstellen, als auch hoch schlagfeste Kunststoffe. Ebenso sind extrem hohe Abriebbeständigkeiten genauso darstellbar, wie besonders harte oder transparente Formteile. Neben Duromeren Polyurethanen gibt es auch Thermoplastische Polyurethane (TPU). Im Gießereimodellbau finden Polyurethane vorwiegend als Gießharze Verwendung. Chemisch betrachtet entstehen Urethane durch die Reaktion eines Isocyanats mit einem Alkohol.



Polyurethane erhält man folglich durch die Reaktion von zwei- oder mehrwertigen Isocyanaten mit linearen oder verzweigten Polyether- und/oder Polyesterpolyolen. Als Isocyanat-Härter kommt bei Gießharzen im Modell- und Formbau zumeist modifiziertes 4,4'-Diisocyanatodiphenylmethan, kurz MDI zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein aromatisches Isocyanat und der so hergestellte Formstoff ist nicht UV-beständig. Zu erkennen ist dies an der allmählichen Vergilbung des Formstoffs. Weitere wichtige Isocyanate in der Industrie sind Toluylendiisocyanat (TDI), Hexamethylen-diisocyanat (HDI) und Isophorondiisocyanat (IPDI), sowie auch Prepolymere auf Basis der vorgenannten Typen. Isocyanate werden durch Umsetzung von Aminen mit Phosgen großtechnisch hergestellt.



Die wichtigste Kennzahl der Isocyanate für die genaue Berechnung der Mischungsverhältnisse ist der NCO-Gehalt, also der Gehalt an Funktionellen Gruppen, die chemisch reagieren können.

Bei den Polyolen kommt eine Vielzahl an verschiedenen Typen zum Einsatz. Hiermit werden die Eigenschaften des Formstoffs im Wesentlichen gesteuert. Es werden sowohl Polyetherpolyole verwendet, als auch Polyesterpolyole. Letztere führen zu einer verbesserten Standfestigkeit, da sie einen höheren Schmelzpunkt besitzen als Polyetherpolyole. Im Gegensatz zu den Isocyanaten handelt es sich bei den Polyolen um sehr langkettige polymere Verbindungen, die durch den Härter verknüpft werden. Dies erklärt auch die im Vergleich zu Epoxiden deutlich besseren Elastizitäten und Schlagfestigkeiten. In Gießharzen ist oft ein Gemisch verschiedener Polyole vorhanden. Immer mehr kommen heute auch Polyole auf Basis nachwachsender Rohstoffe (Pflanzenöle) zum Einsatz. Kennzahl für die Berechnung der Mischungsverhältnisse und damit der Reaktionsmöglichkeiten ist bei Polyolen die OH-Zahl. Oft sind auch Angaben der mittleren Funktionalität der Polyole zu finden.

Bei einigen wenigen der Gießharze die im Gießereimodellbau, z.B. für die Herstellung von Kernkästen Verwendung finden, werden jedoch neben Isocyanaten und Polyolen auch noch andere Stoffe verwendet, die teilweise leider auch giftig sind. Dies nimmt man derzeit noch in Kauf zugunsten der damit erzielbaren Eigenschaften, insbesondere in Bezug auf die Abriebfestigkeit und Schlagzähigkeit.

Die Topf- und Aushärtezeiten der Polyurethane werden durch die Zugabe von Katalysatoren eingestellt. Diese sind in den fertigen Formulierungen bereits enthalten. Am Markt übliche Schnellgießharze haben Topfzeiten von ca. 3 bis 5 Minuten. Langsamere Systeme sind mit Verarbeitungszeiten bis zu 60 Minuten erhältlich. Die Polymerisation selbst ist, wie auch bei den Epoxiden, eine Polyadditionsreaktion. Wichtig ist auch hier, dass das vorgegebene Mischungsverhältnis genau eingehalten wird, da jede funktionelle Gruppe des Härter auch mit einer Gruppe des Harzes reagieren kann. Wichtig ist auch eine gute Durchmischung der Ansätze, damit die Reaktionspartner zueinander finden. Die Reaktion ist exotherm. Um größere Ansätze auf einmal verarbeiten zu können, ist eine entsprechend langsame Einstellung der Topfzeit erforderlich. Schnelle Systeme können dafür durch Zugabe von Topfzeitverlängerern (Inhibitoren) angepasst werden.

Ein weiterer Aspekt im Zusammenhang mit der Topfzeit und der bei kurzen Verarbeitungszeiten entstehenden großen Reaktionswärme ist der Schwund der Formteile im ausgehärteten Zustand. Dies resultiert dadurch, dass der Kunststoff durch die Exothermie leicht Temperaturen von 100°C und mehr bei der Reaktion erreichen kann. Bei dieser Temperatur härtet der Kunststoff aus und kühlt danach wieder auf Raumtemperatur ab. Dabei zieht sich der Formstoff wieder zusammen. Dieser Effekt lässt sich durch Zugabe von Füllstoffen deutlich reduzieren. Hierbei ist aber zu beachten, dass der verwendete Füllstoff absolut trocken ist. Füllstoffe reduzieren im Allgemeinen auch die Exothermie und wirken so zudem Topfzeitverlängernd. Dies hängt allerdings auch von der chemischen Beschaffenheit des Füllstoffs ab. Es ist durchaus möglich, dass ein Füllstoff auch katalytisch wirkt. Deshalb ist ein Füllstoff vor Verwendung auf seine Eignung zu prüfen.

Eine beim vollen Verguß unerwünschte Eigenart der Isocyanate ist die besonders willige Reaktion mit Wasser, bzw. enthaltener Feuchtigkeit. Bei der Reaktion entstehen ein Harnstoffderivat und Kohlenstoffdioxid, das für das unerwünschte „Wachsen“ der Gießlinge verantwortlich ist. Da Harze (Polyole) im Allgemeinen sehr leicht Feuchtigkeit aufnehmen – der Chemiker spricht hier von Hydrophilie – muss die Polyolkomponente gut vor Feuchtigkeitsaufnahme geschützt werden. Da gutes Verschließen der Behälter alleine nicht ausreicht, wird den Gießharzen ein Feuchtigkeitsabsorber, auch Molekularsieb genannt zugegeben. Das ist eine in der Regel helle Paste, die der Hersteller dem Harz bereits zugesetzt hat. Vor Gebrauch soll das Harz gut aufgeschüttelt werden um so die enthaltene Feuchtigkeit abzufangen.

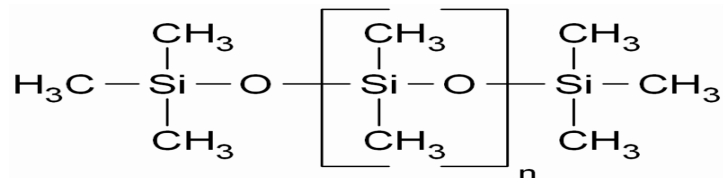


Bei anderen Anwendungen ist die Reaktion mit Wasser dagegen erwünscht. Hat man früher Polyurethane noch mit FCKW-haltigen Treibmitteln (überwiegend R 11) aufgeschäumt, in dem das Treibmittel durch die Exothermie verdunstet und so das noch weiche Polyurethan aufschäumt, so wird heute als Treibmittel für die Herstellung von Schäumen vorwiegend Wasser eingesetzt. Das bei der Reaktion mit dem Isocyanat entstehende Kohlenstoffdioxid (CO₂) sorgt für den nötigen Druck, der in geschlossenen Schäumformen dann allerdings auch sehr hoch werden kann.

Silikone

Silikone sind synthetische Polymere, deren relativ lange Molekülketten abwechselnd aus Siliciumatomen und Sauerstoffatomen aufgebaut sind. Obwohl in der Struktur sehr ähnlich dem Aufbau von kettenförmigen Kohlenwasserstoffen (Alkanen) sind sie nicht eindeutig der organischen Chemie zuzuordnen, sondern stellen eine Art Zwitterform (Hybrid) dar. In der Chemie ebenfalls geläufig ist für Silikone die Bezeichnung Siloxane, bzw. Poly(dimethyl)siloxane. Die Bezeichnung Silikone leitet sich vom englischen "silicon ketone" ab. Einfache lineare Silikone sind nach dem Schema $(R_2SiO)_n$ aufgebaut und R_2SiO entspricht der allgemeinen Formel für Ketone $R_2C=O$. Da Si-O-Doppelbindungen jedoch nicht stabil sind, ist diese Ableitung rein formal. Der internationale Freiname der Verbindung lautet Dimeticon.

Ausgangsmaterialien zur Herstellung sind staubfein gemahlenes Silicium (Si) und Methylchlorid (CH_3Cl). Diese werden unter Verwendung von Kupfer als Katalysator bei ca. $300^\circ C$ in Fließbettreaktoren zu Methylchlorsilanen umgesetzt (Müller-Rochow-Synthese). Durch fraktionierte Destillation werden die Methylchlorsilane getrennt



Die Eigenschaften der Silikone werden einerseits durch die Kettenstruktur und Länge bestimmt. Zum Anderen können über die Methylgruppen (CH_3 -) weitere organische Ketten und Gruppen mit entsprechenden Reaktionsmöglichkeiten angefügt werden. Die gewöhnlich in der Technik verwendeten Silikonharze sind vernetzte Polymethylsiloxane oder Polymethylphenylsiloxane, deren Elastizität und Wärmebeständigkeit mit dem Gehalt an Phenylgruppen steigt. Reine Methylsilikonharze sind relativ spröde und mäßig wärmebeständig. Für den Einsatz z.B. als Formbaumaterial müssen Silikone vernetzt werden. Erst dann entsteht das Silikon-Elastomer. Ein besonderer Vorteil der Silikone ist die allgemein sehr hohe Elastizität und der sehr große Temperaturbereich, in dem Silikone dauerhaft eingesetzt werden können. Dieser reicht in der Regel von -50 bis $+200^\circ C$ und kann kurzzeitig auch noch deutlich darüber liegen.

Für den Einsatz im Modell- und Formenbau werden im Wesentlichen 2K-Silikone verwendet, die bei Raumtemperatur vernetzen (auch vulkanisieren, da bei Elastomeren die übliche Bezeichnung), so genannte RTV Silikone. Diese RTV Silikone werden noch in zwei Gruppen unterschieden, die den Vulkanisationsmechanismus betreffen. Kondensationsvernetzende Silikone haben als reaktive Gruppe eine Hydroxylgruppe ($R-OH$). Additionsvernetzende Silikone werden über eine Vinylgruppe ($R-CH=CH_2$) vernetzt. Wie der Name schon sagt, gibt es bei der Vernetzung von Kondensationsvernetzenden Silikonen ein Spaltprodukt, das bei der Reaktion entsteht und dem Vulkanisat langsam entweicht. Dies ist in der Regel ein kurzkettiger Alkohol, meist Ethanol oder Propanol. Bei additionsvernetzenden Silikonen entsteht kein weiteres Reaktionsprodukt. Bedingt durch das Entweichen des Kondensats schrumpfen Formen aus Kondensations-Systemen im Laufe der Zeit leicht. Dieser Effekt ist unvermeidbar.

Bei den Vernetzern handelt es sich im Allgemeinen um Metallorganische Verbindungen. Die Vernetzer von additionsvernetzenden und kondensationsvernetzenden Silikonen sind

untereinander nicht kompatibel. Mit den Vernetzern können die Eigenschaften ebenfalls gesteuert werden. Auch die Topf- und Verarbeitungszeiten können durch Zugabe von Katalysatoren verändert werden. Bei Additionsvernetzenden Silikonen kann die Aushärtezeit auch über die Temperatur gesteuert werden. Je höher die Temperatur, desto kürzer die Aushärtezeit. Analog ist auch eine Topfzeitverlängerung möglich. Chemische Topfzeitverlängerer, die nachträglich eingerührt werden können, sind ebenfalls erhältlich

Wie auch bei Epoxiden und Polyurethanen ist das vorgegebene Mischungsverhältnis genau einzuhalten. Insbesondere bei Additionsvernetzenden Silikonen ist auch auf Sauberkeit zu achten, bzw. darauf, dass manche Stoffe nicht hiermit abgeformt werden können. Stoffe wie z.B. synthetischer oder Naturkautschuk, Weichmacher, Amine, Schwermetallverbindungen und schwefelhaltige Verbindungen führen zu einer deutlichen Verlangsamung, bzw. zu einer Blockierung der Vernetzung.

Silikone enthalten meist spezielle Füllstoffe, die die Eigenschaften verbessern, bzw. den Erfordernissen anpassen. Dennoch kann es vom Anwender gewünscht sein, weitere Füllstoffe, Farben oder gar andere Silikone und Silikonöle beizumischen. Hierbei ist zu beachten, dass unvernetzte Kondensations-Systeme absolut unverträglich mit Additions-Systemen sind. Gleiche Systeme können dagegen auch untereinander gemischt werden. Bei Farben und Füllstoffen ist insbesondere bei Additionsvernetzenden Silikonen darauf zu achten, dass die Vulkanisation nicht gestört wird. Bei nachträglichen Formulierungen sollte hierzu stets der Hersteller befragt werden. Dies gilt auch für die Verwendung von Thixotropiermitteln, die auf die jeweiligen Systeme abgestimmt sein müssen.

Silikone sind im Allgemeinen selbst trennend. Eine spezielle Behandlung der Oberflächen mit Trennmitteln ist deshalb eigentlich nicht erforderlich. Allerdings kann es bei verschiedenen Oberflächen immer wieder auch zu stärkeren Anhaftungen kommen. Im Einzelfall ist deshalb die Verwendung von Trennmitteln ratsam. Hierzu sollten aber keine ölbasierenden Trennmittel verwendet werden. Nichtreaktive und somit unvernetzte Silikonöle werden in der Industrie auch als Trennmittel eingesetzt. Die Viskositäten der auch als Schalöl bekannten Öle liegt dabei deutlich unter denen der vernetzbaren Silikonharze. Auf Basis von Silikonölen gibt es für die Industrie auch eine breite Palette an Entschäumern und Entlüftern.

Aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung sind insbesondere die additionsvernetzten Silikone physiologisch unbedenklich. So ist der dauerhafte Hautkontakt in der Regel risikolos. Auch für Anwendungen im Lebensmittelbereich sind solche Silikone deshalb zugelassen. Dies ist durch die Bundesanstalt für Risikobewertung attestiert. Im Handel sind viele weitere Artikel aus Silikonen zu finden, wie z.B. Schläuche, Kuchenformen und auch in der Orthopädie- und Medizintechnik finden sich viele Hilfsmittel aus Silikonen. Das reicht von der Abformmasse der Zahnärzte über Prothesenmaterial bis hin zu künstlichen Herzklappen. Hier macht man sich zu nutze, dass das menschliche Immunsystem kaum auf die Silikone reagiert.

Im Kunstguss wird Silikon zur Herstellung von Negativformen für den späteren Abguss von Skulpturen und Reliefs verwendet. Silikon zeichnet sich dabei durch die Abzeichnungsgenauigkeit von Oberflächendetails aus und ist beim Aushärten der gegossenen Form praktisch schrumpffrei. Aus dem selben Grund wird Silikon auch für die Formherstellung im Rapid Prototyping, speziell vor allem beim Vakuumgießen eingesetzt.

Eigenschaften und Prüfung

Die verschiedenen Kunststoffe werden vom Anwender für seine Arbeit entsprechend seinen Anforderungen ausgewählt. Die Hersteller dieser 2 Komponenten Systeme geben die Eigenschaften des ausgehärteten Formstoffs in der Regel an. Die Eigenschaften, die so auch gewünscht sind und immer Ziel der Entwicklung von Kunststoffsystemen sind, werden nach genau bestimmten Prüfmethoden geprüft. Üblich ist auf technischen Merkblättern auch die genaue Angabe der verwendeten Prüfmethode. Da es bei den Prüfmethoden zum Teil erhebliche Unterschiede geben kann, ist diese Angabe, wie auch evtl. eine Angabe der Prüftemperatur, sowie weiterer Prüfparameter außerordentlich wichtig.

Härte

Eines der wichtigsten Merkmale zur Unterscheidung von Kunststoffen ist die Härte des Formstoffs. Gebräuchlich sind hier die Barcol-Härte, Martens Härte und die Shore Härte.

Die Barcol-Härte ist eine Härteskala, die vorwiegend für die Einteilung von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) Anwendung findet. Nach der Norm DIN EN 59 wird sie, wie auch die Shore-Härte, unter Zuhilfenahme eines Handmessgerätes und eines Kegelstumpfes mit einer flachen Spitze bestimmt. Der ganzzahlige Wert wird direkt an der Skala der Messuhr abgelesen.

Das Martens-Härteverfahren ist nach dem deutschen Physiker Adolf Martens benannt worden und wird auch als instrumentierter Eindringversuch bezeichnet. Im Jahre 2003 wurde die Universalhärte in Martenshärte umbenannt. Das Verfahren ist in der DIN EN ISO 14577, 1-3 genormt. Bei diesem Verfahren wird während der Belastungs- und Entlastungsphase kontinuierlich die Kraft und die Eindringtiefe gemessen. Die Martenshärte (HM) wird definiert als das Verhältnis der Maximalkraft zu der dazugehörigen Kontaktfläche und wird in der Einheit Newton pro Quadratmillimeter angegeben.

Die Shore-Härte, benannt nach Albert Shore, ist ein Werkstoffkennwert für Elastomere und Kunststoffe und ist in den Normen DIN 53505 und DIN 7868 festgelegt. Das Kernstück des Shore-Härte-Prüfers besteht aus einem Feder belasteten Stift aus gehärtetem Stahl. Dessen Eindringtiefe in das zu prüfende Material ist ein Maß für die entsprechende Shore-Härte, die auf einer Skala von 0 Shore (2,5 Millimeter Eindringtiefe) bis 100 Shore (0 Millimeter Eindringtiefe) gemessen wird. Eine hohe Zahl bedeutet eine große Härte. Bei einem Shore-Härteprüfgerät ist prinzipiell eine Zusatzeinrichtung notwendig, die die zu messende Probe mit einer Kraft von 12,5 Newton bei Shore-A, bzw. 50 Newton bei Shore-D auf den Messtisch andrückt. Praktisch kommen aber zumeist Handgeräte zum Einsatz. Bei der Bestimmung der Shore-Härte spielt die Temperatur eine höhere Rolle als bei der Härtebestimmung metallischer Werkstoffe. Deshalb wird hier die Solltemperatur von 23 °C auf das Temperaturintervall von ± 2 K beschränkt. Die Materialdicke sollte im Bereich von 0 bis 50 Shore mindestens 9 Millimeter, bei härteren Substanzen mindestens 6 Millimeter betragen. Die Angabe Shore A wird bei Weichelastomeren verwendet, wogegen die Shore D Härte bei zähelastischen und harten Kunststoffen gemessen wird. Angegeben wird die Shore Härte mit dem Zusatz A oder D und ohne Nachkommastelle.

Wärmeformbeständigkeit

Die Angabe der Wärmeformbeständigkeit erfolgt im Allgemeinen als „Formbeständigkeit in der Wärme nach Martens“ oder als „Glasübergangstemperatur“, kurz Tg (engl. glass transition temperature). Der Tg –Wert gibt die Temperatur an, unterhalb derer ein duromerer Kunststoff sich amorph, glasartig verhält und oberhalb derer er gummielastisch wird. Es

handelt sich dabei also um eine Erweichungstemperatur die angibt, bis zu welcher Temperatur ein Kunststoff noch einsetzbar ist, ohne dass mit starker Verformung gerechnet werden muss. Die Messung erfolgt mittels dynamischer Messmethoden, wobei entweder eine tatsächliche Erweichung registriert wird (DMA), oder aber eine besondere Wärmeabgabe beim Überschreiten der Glastemperatur gemessen wird (DSC)

Bei der Formbeständigkeit in der Wärme nach Martens handelt es sich im Prinzip um einen sehr praxisnahen Versuch. Ein Prüfkörper mit genau festgelegten Dimensionen wird in einem Ofen mit Wärme belastet. Die Steigrate der Erwärmung ist dabei ebenfalls exakt definiert. Zusätzlich wird der Prüfkörper mit einem Gewicht beaufschlagt. Die Wärmeformbeständigkeit nach Martens ist dann die Temperatur, die der Prüfkörper noch ohne Verformung überstanden hat.

Biegefestigkeit

Die Bestimmung der Biegefestigkeit und die hiermit verbundene Bestimmung des E-Moduls sind rein mechanische Prüfungen. Die Biegefestigkeit in der technischen Mechanik ist ein Wert für eine Biegespannung in einem auf Biegung beanspruchten Bauteil, bei dessen Überschreiten das Versagen durch Bruch des Bauteils eintritt. Die Messung erfolgt nach DIN 53452 mit einer genau definierten Biegegeschwindigkeit. Aus der Kraft die zur Biegung des Prüfkörpers um einen bestimmten Winkel erforderlich ist (Biegedehnung, %), lässt sich nach DIN 53457 auch das Elastizitäts-Modul (E-Modul) ermitteln. Die Angabe beider Werte erfolgt in N/mm^2 und wird bei 20°C gemessen. Zur Prüfung werden genormte Probestäbe in ein Prüfgerät eingespannt und mit definierter Geschwindigkeit gebogen. Die auftretenden Kräfte werden allgemein mit Kraftmessdosen registriert.

Zugfestigkeit

Ähnlich wie die Bestimmung der Biegefestigkeit ist auch die Bestimmung der Zugfestigkeit ein rein mechanischer Prüfablauf, der mit den selben Prüfgeräten durchgeführt werden kann. Hierbei wird der in seinen Dimensionen genau definierte Prüfkörper mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit so lange gestreckt, bis er zerreißt. Die bis zum Reißen aufgewendete Kraft wird gemessen und nach DIN 53455 in N/mm^2 angegeben. Analog des E-Moduls aus Biegefestigkeit wird oft auch ein E-Modul aus Zugfestigkeit angegeben. Dabei wird ebenfalls die Kraft ermittelt, die zum Strecken des Prüfkörpers um einen bestimmten Betrag aufgewendet werden muss. Die Angabe erfolgt in N/mm^2 .

Abweichend von den harten Kunststoffen wird bei Elastomeren die Zugfestigkeit im Allgemeinen nach ISO 37-94 bestimmt. Wesentlicher Unterschied ist dabei die höhere Abzugsgeschwindigkeit. Da Elastomere eine deutlich höhere Streckgrenze aufweisen wird das E-Modul aus Zugfestigkeit üblicherweise bei einer Dehnung von 100% angegeben. Außerdem sind für den Zugversuch nach ISO 37-94 verschiedene Prüfkörper vorgesehen, da die auftretenden Kräfte bei den kleinen Prüfkörpern z.T. zu gering ausfallen und nur schwer eine exakte Bestimmung möglich ist.

Prüfungen der flüssigen Komponenten

Selbstverständlich sollen auch die Harze und Härter die dem Anwender zugesicherten Eigenschaften haben. Wichtige Prüfparameter für die flüssigen Komponenten sind zum einen die Viskosität der einzelnen Komponenten, aber auch die Mischviskosität des fertig angemischten Systems. Da die Mischviskosität sich aber mit fortschreitender Reaktion ständig ändert, kann nur die Mischviskosität unmittelbar nach Vermischen bestimmt und angegeben werden. Die Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit. Je höher die Viskosität, desto dickflüssiger ist ein Harz. Die Viskosität wird üblicherweise mit Brookfield Viskosimetern

des Typs RV gemessen. Neben der Angabe der gemessenen Viskosität, die bei einer definierten Temperatur gemessen wird (meist 23 oder 25°C), ist auch die bei der Messung verwendete Spindel und die Drehzahl anzugeben. Die Einheit der dynamischen Viskosität ist Pa • s , bzw. bei niedrigen Viskositäten auch mPa • s.

Neben der Viskosität wird oft auch die Dichte von Flüssigkomponenten angegeben. Diese wird immer dann benötigt, wenn Flüssigkomponenten nach Volumen dosiert werden sollen. Die Angabe des Mischungsverhältnis erfolgt dagegen zumeist in Gewichtsanteilen. Die Dichte ist der Quotient aus dem Gewicht im Verhältnis zu dem dazugehörigen Volumen. Bei Wasser rechnet man allgemein mit dem gerundeten Wert von 1,0. Der Kehrwert der Dichte ist das spezifische Volumen. Bei Flüssigkeiten kann die Dichte relativ einfach mit so genannten Spindeln (od. Aräometer) bestimmt werden. Spindeln haben ein bauchiges, mit Gewichten beschwertes Unterteil und im oberen Bereich einen dünnen Hals mit Skalierung. Die Dichte wird an der Eintauchtiefe der Skala abgelesen und z.B. in g/cm³ angegeben. Bei anderen Verfahren zur Dichtebestimmung wird ein genau bekanntes Gefäß (Pyknometer) randvoll gefüllt und gewogen, woraus sich ebenfalls die Dichte errechnet. In der chemischen Produktion wird die Dichte im laufenden Produktionsprozess durch Strahlenabsorption von in der Regel Gammastrahlern gemessen.

Eine für die Verarbeitung von 2 Komponenten Systemen besonders wichtige Angabe ist die Verarbeitungs- oder Topfzeit. Hierbei wird diejenige Zeit angegeben, bis zu der das System entsprechend der Anwendung verarbeitbar ist. Bei entsprechend niedrig viskosen Flüssigkeiten ist das die Zeit innerhalb derer die Flüssigkeit noch vergossen werden kann. Bei Oberflächenharzen wird neben der Topfzeit, die angibt wie lange die Paste aufgetragen werden kann, auch die Gelzeit angegeben. Innerhalb dieser Zeit ist ein weiterapplizieren der nächsten Schicht noch möglich ohne dass die Gefahr von Delamination besteht. Der Übergang von flüssig zu fest kann gerade bei Schnellgießharzen sehr plötzlich erfolgen. Bestimmt wird die Topfzeit u.a. mit Gel-Timern. Dabei mischt ein kleiner Stab das Reaktionsgemisch permanent durch. Bei entsprechendem Viskositätsanstieg wird das Reaktionsgefäß angehoben und schaltet die Messung ab. Die Zeit kann dann direkt abgelesen werden.

Neben den beschriebenen Prüfverfahren für die Bestimmung der Eigenschaften von Flüssigkomponenten und den daraus hergestellten Kunststoffen gibt es auch noch einige Verfahren, die die Alterung der Stoffe unter definierten Bedingungen simulieren können. Dies ist deshalb von Bedeutung, da immer wieder Vorhersagen für die dauerhafte Beständigkeit von Kunststoffen vom Kunden gewünscht werden, diese aber in der zur Verfügung stehenden Zeit eigentlich nicht gemacht werden können. Beispielsweise kann eine Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung bei Kunststoffen gefragt sein. Das Ergebnis wäre unter Umständen erst nach Jahren an einer Vergilbung zu erkennen. Dies kann man recht gut mit intensiver UV-Bestrahlung in entsprechenden Prüfkammern simulieren, wobei gleichzeitig auch noch eine Bewitterung möglich ist.

Es gibt natürlich genormte Verfahren wie z.B. die *beschleunigte Alterung (unter Einfluss von heißer Luft)* gem. ISO 2440, oder die *Bestimmung der Eindruckhärte* gem. DIN EN ISO 868 (Shore), aber zum Leidwesen der Kunden gibt es auch eine große Vielfalt an Verfahren, die die Hersteller selbst entwickelt haben und als „Prüfung nach interner Methode“ angeben. Diese Werte sind bestimmt hilfreich, allerdings untereinander nicht vergleichbar.

Modellbauwerkstoffe

Der wohl älteste Modellbauwerkstoff ist sicher Holz. Auch heute haben verschiedene Hölzer im Modell- und Formenbau noch immer eine große Bedeutung. Aber künstliche Werkstoffe haben im Laufe der Zeit immer mehr natürliche Werkstoffe verdrängt. So wie auch immer mehr Kunststoffe für die verschiedenen Gießanwendungen entwickelt wurden, hat man parallel dazu auch immer mehr Werkstoffe entwickelt, die mit ihren speziell für die verschiedenen Anwendungen angepassten Eigenschaften ganz auf die Wünsche der Kunden hin maßgeschneidert wurden. Dabei reicht das Spektrum heute von sehr leichten Werkstoffen mit Raumgewichten von nur wenigen Kilogramm je Kubikmeter bis hin zu schweren Blockmaterialien mit Dichten von bis zu ca. 2 Tonnen, also der doppelten Dichte von Wasser.

Leichte Modellbauwerkstoffe enthalten naturgemäß einen Großteil an Luft. Am weitesten verbreitet sind hierbei Polyurethanschäume und Polystyrol ©. Diese Werkstoffe werden allgemein als Platten und auch als großvolumige Blöcke verschiedener Dimension am Markt angeboten – bis hin zu Volumen von bis zu 10cbm. Schwere Modellbauwerkstoffe basieren zumeist auf Polyurethanen oder Epoxiden. Diese sind zudem mit verschiedenen Füllstoffen angereichert, um die hohe Dichte zu realisieren. Solche Werkstoffe werden allgemein als Platten vertrieben. Darüber hinaus sind letztlich auch Eisen und Stahl künstlich erzeugte Modell- und Formbauwerkstoffe.

Wie bei den Gießharzen handelt es sich bei den Modellbauwerkstoffen auch um Reaktionsprodukte von wenigstens zwei Komponenten. Die durch Polymerisation entstehenden Werkstoffe werden während der flüssigen Phase in entsprechende Formen gefüllt und nach abgeschlossener Reaktion entformt. Da es sich prinzipiell um den selben Reaktionsmechanismus aus dem Bereich der organischen Chemie wie beim Handverguß handelt, sind für den Werkstoffhersteller auch die selben Aspekte zu beachten, wie sie der Modellbauer bei seinem Verguß vor Ort auch beachten muss. Die Reaktion ist exotherm und muss in der Reaktionszeit soweit gesteuert werden, dass es nicht zu Überhitzung im Kern kommt. Anders als beim Abformen von Ur- und Kopiermodellen ist der Schwund allerdings nicht so problematisch, da die Platten oder Blöcke nach der Fertigung noch rundum geplant und somit auf das bestimmte Format gebracht werden. Vorher werden die meisten Modellbauwerkstoffe aber noch einer Wärmebehandlung unterzogen (getempert). Dies soll späterem Verzug und Schüsselung vorbeugen.

Durch die Auswahl der Komponenten lassen sich eine Vielzahl an verschiedenen Anforderungen erfüllen. So können Modellbauwerkstoffe beispielsweise recht hohen Temperaturen standhalten, oder aber außerordentlich abriebfest sein. Solche Eigenschaften werden im Allgemeinen durch die Auswahl der geeigneten chemischen Rohstoffe gesteuert. Andere Werkstoffe zeichnen sich dagegen durch eine besondere Maßhaltigkeit und geringen Ausdehnungskoeffizienten aus. Diese Eigenschaften können sehr gut durch die richtige Auswahl der Füll- und Zuschlagstoffe eingestellt werden, sowie durch den Füllgrad. Wichtig ist auch die Bearbeitbarkeit der verschiedenen Werkstoffe. Hier können durch die Wahl des Füllstoffs seitens des Herstellers schon große Unterschiede bestehen. So gibt es die Möglichkeit geringe Raumgewichte durch Aufschäumen oder aber durch Zugabe von Leichtfüllstoffen zu erzeugen. Beide Verfahren haben unbestritten ihre Vorteile. Leichtfüllstoffe bestehen aber oftmals aus kleinsten Glashohlkörpern, die wiederum den Verschleiß von Werkzeugen forcieren.

Rapid Prototyping

Neben speziell für die Prototypenfertigung, bzw. die Fertigung von Urmodellen entwickelten Verfahren, wie beispielsweise das Lasersintern oder die LOM-Technik, findet man im Prototypenbau sämtliche Kunststoffe, die auch sonst im Modell- und Formenbau zur Anwendung kommen. Besonderheit hier ist aber, dass insbesondere mit den Vakuum-Gießharzen und RIM-Harzen die Eigenschaften anderer, zumeist thermoplastischer Kunststoffe möglichst realistisch simuliert werden sollen. Dies gilt natürlich nur für einen bestimmten Temperaturbereich. Immerhin sind Duromere Werkstoffe heute aber schon in Bereichen von deutlich unter -20°C bis hin zu Temperaturen im Bereich von bis zu 200°C einsetzbar. Silicone erlauben sogar noch weit höhere Temperaturen.

Ein recht seriennahes Verfahren im Rapid Prototyping ist der Niederdruck Reaktionsstritzguß (RIM, engl. = **R**eaction **I**njection **M**oulding). Dieses Verfahren kommt zwar ähnlich auch in der Serienfertigung zum Einsatz, wobei dann aber die Anforderungen an Verarbeitungs- und Taktzeiten und auch an die Endigenschaften doch noch stark abweichen können. Aufgrund der großen Bandbreite der zu simulierenden Kunststoffe gibt es auch entsprechend viele Prototypen-Harze. RIM-Harze sind grundsätzlich Kombinationen aus einem Harz (zumeist Polyolen) und einem Isocyanat. Die Reaktion verläuft demzufolge nach dem selben Mechanismus ab wie er bei Polyurethan-Gießharzen beschrieben ist. Hier allerdings deutlich beschleunigt und deshalb auch mit einer deutlich höheren Exothermie. Dies ist beim Schwund, bzw. der Konstruktion des Urmodells und auch bei den Trennmitteln zu berücksichtigen. Im Allgemeinen lassen sich die mechanischen Eigenschaften der aus RIM-Harzen hergestellten Teile durch anschließende Temperung noch deutlich steigern. Das gilt insbesondere für die Schlagfestigkeit. Formen für das RIM-Verfahren werden teilweise aus Siliconen gefertigt, die dann zusätzlich gestützt werden sollten. Aufgrund des Drucks beim Befüllen der Form (ca. 6 bar) sind harte Formen, z.B. aus Modellbauwerkstoff jedoch günstiger.

Ein besonders großes Spektrum an verschiedenen mechanischen Eigenschaften decken die im Rapid Prototyping vielfach verwendeten Vakuum-Gießharze ab. Hier werden nahezu alle Eigenschaftsprofile von gummielastisch bis sehr hart, oder besonders hohe Schlagzähigkeit abgedeckt. Um auch bei der Verarbeitung variabel zu sein, sind meist verschiedene Topfzeiten verfügbar, bzw. durch Kombination der einzelnen Komponenten verschiedene Arbeitsweisen möglich. Die Hersteller von Vakuum-Gießharzen bieten ihre Harze meist mit Angaben über die zu simulierenden Kunststoffe an. So werden neben Zugfestigkeiten und Biege E-Modulen in der Regel auch die simulierten Kunststoffe wie PE, PP, ABS oder PA angegeben. Wie auch bei den meisten RIM-Harzen wird von den Herstellern nach der Aushärtung der aus Vakuum-Gießharzen gefertigten Teile eine nachfolgende Wärmebehandlung (Temperung) empfohlen. Dadurch lassen sich die mechanischen Eigenschaften zum Teil noch deutlich steigern. Bei manchen Produkten werden die beschriebenen Eigenschaften ohne Temperung gar nicht erreicht. Insbesondere das Erreichen von hohen Wärmeformbeständigkeiten und Schlagfestigkeiten erfordert eine Temperung. Zwar können sich die Eigenschaften auch durch längere Lagerung bei Raumtemperatur noch geringfügig verbessern. Die Wärmebehandlung ist aber nicht zu ersetzen, da es erst bei erhöhten Temperaturen zu physikalisch bedingten Ausrichtungen der Teilchen kommt.

Auch absolut transparente und zudem UV-beständige Teile lassen sich fertigen. Bei transparenten Gießharzen kommt aber bei der Verarbeitung eine Besonderheit hinzu: da hier als Schutz vor Feuchte kein Molekularsieb zugegeben werden kann, sind transparente Vakuum-Gießharze allgemein im Vakuum vor dem Vermischen mit dem Härter zu

Entfeuchten. Dies geschieht am besten, wenn das zuvor leicht erwärmte Harz einige Zeit unter vollem Vakuum gerührt wird. Die enthaltene Feuchte wird dabei in der Regel gut aus dem System entfernt. Feuchtigkeit würde sonst zu einem schlechten Gießling führen, da bei der Reaktion mit dem Härter Bläschen entstehen würden. Obwohl Vakuum-Gießharze in einem recht hohen Preissegment angesiedelt sind, ist die Fertigung von Prototypen mit diesem Verfahren aufgrund der geringen Form-Herstellungskosten im Vergleich zu Serienverfahren recht günstig. Auch Vakuum-Gießharze sind im Allgemeinen Polyurethan-Systeme.

Ein aus arbeitshygienischer Sicht besonders wichtiger Aspekt ist die Gefährlichkeit der verwendeten Arbeitsstoffe. Die meisten Vakuum-Gießharze sind nicht als Gefahrstoff deklariert. Auch die Härter, in der Regel Isocyanate, sind zumeist ungiftig. Auch ist der Dampfdruck der Isocyanate bei Raumtemperatur sehr gering, so dass es kaum zu belastenden Dämpfen kommt. Dies ändert sich allerdings dramatisch im Vakuum. Bei vollem Vakuum entstehen in der Vakuum-Gießanlage erheblichen Mengen an Dämpfen. Diese sind insbesondere bei Isocyanaten nicht ungefährlich, da sie eine starke Reizwirkung, besonders auf Augen, Atemwege und Schleimhäute ausüben. Hier ist es besonders wichtig, dass die Abluft der Vakuum-Anlagen aus dem Arbeitsraum heraus ins Freie abgeführt wird. Einige der verwendeten Vakuum-Gießsysteme, besonders bei Elastomeren und transparenten Gießharzen, sind zudem Quecksilberhaltig, bzw. der Härter ist sogar selbst giftig. Bei der Verwendung von solchen Systemen ist die Einhaltung der Arbeitshygiene besonders wichtig.

Bei Silikonen für den Formbau, insbesondere im Vakuumgießen haben sich praktisch nur transluzente, additionsvernetzende Silikone am Markt durchgesetzt. Dies liegt im Wesentlichen sicher daran, dass man in die Form beim Aufschneiden hineinsehen kann und so das Schneiden entlang der Trennung wesentlich einfacher ist. Auch beim Verguss ist das Füllen der Form sichtbar. Bei den Härtegraden hat sich ein Bereich von ca. Shore A 40-45 etabliert. Im offenen Verguss und bei der Abformung im Kunstsektor werden dagegen oftmals eingefärbte (weiße) kondensationsvernetzende Silikone verwendet. Dies liegt auch daran, dass man mit kondensationsvernetzenden Silikonen praktisch jede Oberfläche abformen kann, ohne dass es zu Vergiftungen (Inhibition) bei der Vernetzung des Kautschuks kommt. Aus additionsvernetzenden Silikonen lassen sich auch sehr gut elastomere Teile fertigen, wie dies auch bei Serienprodukten der Fall ist. Im Unterschied dazu sind die im Prototyping verwendeten Silikone aber fast ausschließlich bei Raumtemperatur vernetzende Systeme.

Epoxidharze finden im Prototypenbau vorwiegend als Laminierharze Verwendung. Hier kommt den Epoxiden zugute, dass mit ihnen Faserverbundteile (Composites) mit sehr anspruchsvollen Eigenschaften gefertigt werden können. Dies betrifft insbesondere die recht hohen Festigkeiten und Wärmeformbeständigkeiten. Dies lässt sich durch moderne Verfahren wie z.B. das Vakuum-Infusions-Verfahren noch deutlich steigern, wobei dann sogar noch Gewichtseinsparungen möglich sind. Aus Epoxid-Harzen gefertigte Composites müssen nach erfolgter Aushärtung in der Regel noch einer längeren Wärmebehandlung unterzogen werden. Durch die allgemein von den Herstellern vorgegebenen Stufen-Temperprogramme lassen sich erst die möglichen hohen Wärmeformbeständigkeiten und Festigkeiten des Bauteils erzielen. Neben den zumeist ungefüllten Laminierharzen gibt es auch gefüllte Laminierharze, mit denen sich in dickeren Schichten arbeiten lässt. Zum Prototypenbau gehört auch der Formbau. Auch hier kommen oft Epoxid-Harz basierende Gel-Coats zum Einsatz. Allerdings hat sich gerade in einer Branche, wo es um kürzeste Lieferzeiten geht der CNC gestützte Formbau stark etabliert.

Klebstoffe

Neben den klassischen Anwendungen des Modell- und Formbaus werden Kunststoffe oder Kunststoffsysteme noch für etliche andere Anwendungen eingesetzt. Ein wichtiger Bereich ist hier sicher das Verkleben. Dass dieser Markt nicht zu unterschätzen ist zeigt sich auch daran, dass z.B. die Firma Henkel hier einen Großteil ihrer Aktivitäten gebündelt hat. Unterscheiden muss man die verschiedenen Klebstoffe zunächst einmal in Einkomponenten Klebstoffe und solche, die aus zwei Komponenten bestehen.

Einkomponenten Klebstoffe können entweder einen dauerhaft klebrigen Film bilden (sogen. PSA-Kleber = **P**ressure **S**ensitive **A**dhesive). Solche Kleber können wiederum auf Lösemitteln oder auch auf Wasser basieren. Anspruchsvolle Systeme bilden an Luftfeuchtigkeit oder durch Abdunsten von leichtflüchtigen Komponenten (pH-Verschiebung) noch zusätzliche Vernetzungen (selbstvernetzend) aus und erhöhen dadurch die Klebkraft. Solche Klebungen sind nach Trennung wieder verklebbar. Andere Klebstoffe härten unter Abgabe leicht flüchtiger Komponenten aus und verbinden die zu klebenden Oberflächen durch ihre ausgeprägte Benetzung der Oberfläche. Solche Kleber sind oftmals nicht elastisch und haben nach Trennung keine Klebwirkung mehr. Eine dritte Gruppe sind wärmeaktivierbare Klebstoffe, die, wie der Name schon sagt, erst durch Zufuhr von Wärme ihre Klebwirkung erzielen. Verklebungen dieser Art können nach Trennung in der Regel wieder verklebt werden.

Zweikomponenten Klebstoffe sind chemisch mit vielen gängigen Gießharzen oder Vergussmassen verwandt. Es gibt ebenso Polyurethan basierende 2K-Kleber wie auch Epoxid-Kleber und die Verarbeitungs- und Aushärtezeiten sind den Anwenderwünschen entsprechend angepasst. Die Reaktionsgeschwindigkeit und somit die Verarbeitungs- und Aushärtezeit ist temperaturabhängig und verkürzt sich mit steigender Temperatur. Beide Systeme härten durch eine Polyadditionsreaktion aus. Demzufolge sind die angegebenen Mischungsverhältnisse genau einzuhalten. Zu beachten ist, dass es auch 1-komponentige Polyurethanklebstoffe gibt. Die 1-komponenten PUR-Klebstoffe härten unter Zugabe von Luftfeuchtigkeit und/oder Wärme aus. Es besteht die Möglichkeit, beide Aushärtemechanismen zu verbinden, so dass eine erste Handlingsfestigkeit durch die Luftfeuchtigkeitshärtung, die Endfestigkeit der Verklebung aber erst unter Wärmeinwirkung erfolgt.

Weit verbreitet sind auch Methyl-Methacrylat-Kleber (PMMA). Diese sind zweikomponentige Reaktionsklebstoffe, bei denen das eingesetzte Monomer - der Methylester der Methacrylsäure - durch radikalische Kettenreaktion polymerisiert wird. Zum Start der Polymerisationsreaktion wird ein reaktives Radikal benötigt, das meist aus einem Peroxid entsteht, wenn man diesem einen Beschleuniger zusetzt. Das heißt, letztendlich benötigt man nur für das Starten der Radikalreaktion das 2K-System, bei dem Peroxid und Beschleuniger zusammenkommen und die Startradikale bilden.

Eine relativ neue Gruppe der Klebstoffe sind die Silanvernetzenden Polymerklebstoffe. Die Vernetzung entsteht wie bei 1-komponentigen Siliconen durch die Reaktion mit Luftfeuchtigkeit. Silanvernetzende Polymerklebstoffe sind meistens zähelastisch mit einer hohen Klebkraft. Mitunter werden sie auch Hybridklebstoffe genannt, weil Polymere und Silane ein Hybrid ergeben. Die Silan-Bausteine können durch chemische Reaktion mit benachbarten Polymermolekülen Brücken schlagen und sich so 3-dimensional vernetzen. Bei der Vernetzung werden niedermolekulare Substanzen wie Methanol oder Ethanol freigesetzt.