

Günter Etzrodt
Albrecht Müller

Kunststoff- einfärbung

Farbmittel, Füllstoffe, Regularien



2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

HANSER



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäÙig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Die Internet-Plattform für Entscheider!

Exklusiv: Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

Richtungsweisend: Fach- und Brancheninformationen
stets top-aktuell!

Informativ: News, wichtige Termine, Bookshop, neue
Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

Kunststoffe.de

Günter Etzrodt
Albrecht Müller

Kunststoff- einfärbung

Farbmittel, Füllstoffe, Regularien

2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Der Autor:

Dr. Günter Etzrodt, www.pigments-consulting.de

Dr. rer. nat. Albrecht Müller †

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [<http://dnb.ddb.de>](http://dnb.ddb.de) abrufbar.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2018 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Herstellung: Jörg Strohbach

Lektorat: Ulrike Wittmann

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: Druckerei Hubert & Co GmbH und Co KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-45462-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-45714-0

Inhalt

Der Autor	XI
Vorwort	XIII
1 Einleitung	1
2 Die Begriffe Farbe und Farbmessung	3
2.1 Grundlagen der Farbmessung	6
2.1.1 Spektralphotometer	6
2.1.2 CIELAB-Methode	7
2.1.3 Einflüsse der Probenbeschaffenheit und Temperatur bei der Farbmessung [3]	8
3 Kunststoffe	11
3.1 Entwicklungsgeschichte	11
3.2 Thermoplastische Polymere	14
3.2.1 Chemische Zusammensetzung und Materialeigenschaften	15
3.2.1.1 Polyvinylchlorid	15
3.2.1.2 Polyolefine	16
3.2.1.3 Polyethylen	16
3.2.1.4 Polypropylen	16
3.2.1.5 Styrolpolymere und Styrol-Copolymerisate	17
3.2.1.6 Acrylharze	17
3.2.1.7 Polyamide	17
3.2.1.8 Polycarbonate	18
3.2.1.9 Sonstige thermoplastische Kunststoffe	18
3.3 Biokunststoffe	22
4 Grundlagen der Farbmittel	27
4.1 Allgemeine Eigenschaften	27
4.2 Farbmittel	28
4.3 Anforderungen an Farbpräparationen	31
4.4 Colour Index	33

5	Anforderungen an Farbstoffe und Prüfmethoden	35
5.1	Farbstärke	35
5.2	Transparenz/Lasur	37
5.3	Deckvermögen	37
5.4	Chemische Beständigkeit	38
5.5	Lichtechtheit/Wetterechtheit	40
5.6	Thermische Beständigkeit	46
5.7	Migrationsechtheit	50
5.8	Schwindung/Verzug	52
5.9	Abrasivität	55
5.10	Dispergierbarkeit	56
5.11	Viskositätsverhalten in der Kunststoffschmelze (Melt-Flow-Index)	58
5.12	Metamerie	59
5.13	PH-Wert	61
5.14	Leitfähigkeit	61
6	Anorganische Pigmente	63
6.1	Weißpigmente	68
6.2	Schwarzpigmente	78
6.3	Buntpigmente	85
6.3.1	Blaue anorganische Pigmente	85
6.3.2	Braune anorganische Pigmente	87
6.3.3	Gelbe anorganische Pigmente	92
6.3.4	Grüne anorganische Pigmente	98
6.3.5	Rote/Orange anorganische Pigmente	100
6.3.6	Violette anorganische Buntpigmente	103
7	Organische Pigmente	107
7.1	Azopigmente	109
7.1.1	Monoazopigmente	110
7.1.1.1	Monoacetoacetarylpigmente	110
7.1.1.2	Disazopigmente	123
7.1.1.3	Verlackte Azopigmente	133
7.1.2	Polycyclische Pigmente	142
7.1.2.1	Phthalocyaninpigmente	143
7.1.2.2	Quinacridonpigmente	147
7.1.2.3	Perylenpigmente	150
7.1.2.4	Perinonpigmente	154
7.1.2.5	Thioindigopigmente	155
7.1.2.6	Dioxazinpigmente	156
7.1.2.7	Triarylcarboniumpigmente	158
7.1.2.8	Diketopyrrolopyrrolpigmente (DPP)	158

7.1.3	Diverse Einzelpigmente	160
7.1.3.1	Metallkomplexpigmente	160
7.1.3.2	Isoindolin-/Isoindolinonpigmente	163
7.1.3.3	Aminoanthrachinonpigmente	165
7.1.3.4	Indanthronpigmente	166
7.1.3.5	Flavanthronpigmente	167
7.1.3.6	Pyranthronpigmente	167
7.1.3.7	Anthanthronpigmente	167
7.1.3.8	Chinophthalonpigmente	168
7.1.3.9	Weitere Einzelpigmente mit bekannter Struktur	168
8	Funktionale Pigmente	171
8.1	Metallpigmente	172
8.2	Perlglanzpigmente	175
8.3	Sonstige Effektpigmente	182
8.4	Leitfähige Pigmente	182
8.5	Laser-Technik	183
8.5.1	Pigmente für die Laserbeschriftung	183
8.5.2	Laser-Schweißen von Thermoplasten	186
8.6	Nachleuchtende Pigmente	190
8.6.1	Phosphoreszierende Pigmente	190
8.7	Funktionale Pigmente für das Wärmemanagement	192
8.8	Effektfarbmittel	193
8.8.1	Tagesleuchtfarben	193
8.8.2	Optische Aufheller	195
8.8.3	Sprenkeeffektpigmente	197
8.8.4	Thermofarben	198
8.8.5	Marmorbatche	199
9	Farbstoffe	201
9.1	Blau	208
9.2	Braun	211
9.3	Gelb	211
9.4	Grün	215
9.5	Orange	217
9.6	Rot	218
9.7	Violet	221
9.8	Schwarz	223

10	Füllstoffe	225
10.1	Eigenschaften von Füllstoffen	225
10.2	Füllstoffe zur Verarbeitung in Kunststoffen	227
10.3	Beeinflussung von Fertigteileigenschaften durch Füllstoffe	227
10.4	Herstellung von Füllstoffen	232
10.5	Eigenschaften wichtiger Füllstoffe	232
10.6	Sonstige Füllstoffe	238
10.7	Kunststofftechnologische Eigenschaften wichtiger Füllstoffe	239
11	Zuschlagstoffe für Kunststoffe	243
11.1	Antimikrobielle Substanzen	244
11.2	Antistatika	245
11.3	Flammschutzmittel	248
11.4	Dispergier-, Gleit- und Trennmittel	249
11.5	Nukleierungsmittel	250
11.6	Stabilisatoren	251
11.7	Treibmittel	256
11.8	Weichmacher	257
12	Pigmentpräparationen	259
12.1	Präparationstyp	260
12.1.1	Monopigmentpräparationen, Farbkonzentrate	260
12.1.2	Granulatpräparationen/Masterbathe	262
12.1.3	Flüssigfarben	267
12.1.4	Pulverpräparationen	270
12.1.5	Bewertung der Präparationen	271
12.1.6	Qualitätssicherung von Pigmentpräparationen	272
13	Verarbeitungsmethoden von pigmentierten Kunststoffen	273
13.1	Spritzgießen	274
13.2	Extrudieren	275
13.3	Blasformen	277
13.4	Kalandrieren	278
13.5	Rotationsformen	279
13.6	Schmelzspinnen	279
13.7	Verarbeitungsfehler und Abhilfe	280
14	Qualitätsmanagement	287
14.1	DIN ISO 9000	287
14.1.1	Prozessorientierter Ansatz	288
14.1.2	Beziehung zu ISO 9004	289

14.1.3	ISO 9001:2015	292
14.1.3.1	Strategische Ausrichtung der Organisation	292
14.1.3.2	Erweiterung der Zielgruppen	292
14.1.3.3	Prozessmanagement wird wichtiger	292
14.1.3.4	Verteilung der Verantwortlichkeiten	293
14.1.3.5	Risikomanagement	293
14.1.3.6	Wissensmanagement	293
14.1.3.7	Dokumentation – Papier-QM-Handbuch war gestern ...	293
14.1.3.8	Fazit	294
14.2	Umweltmanagementsysteme	294
14.2.1	DIN EN ISO 14001:2009	294
14.3	Sicherheitsdatenblatt	298
14.3.1	Sicherheitsdatenblätter (SDB)	298
14.3.2	Zweck	298
14.3.3	Format des Sicherheitsdatenblatts	300
15	Chemikaliensicherheit, CLP-Verordnung, Toxikologie	305
15.1	REACH-Verordnung	305
15.1.1	Grundlagen	305
15.1.2	Der Geltungsbereich	306
15.1.3	Missbrauch	307
15.1.4	Die Registrierung	307
15.1.5	Der Stoffsicherheitsbericht	308
15.1.6	Risikobeschreibung	309
15.1.7	Internetzugang zu den REACH-Daten	309
15.1.7.1	Informationspflichten	310
15.2	Die CLP-Verordnung	310
15.3	Toxikologie	312
15.3.1	Akute Toxizität	313
15.3.2	Chronische Toxizität	314
15.3.3	Mutagenität	315
15.3.4	Teratogenität/Embryotoxizität	315
15.3.5	Generationsversuch	315
15.3.6	Ökologie	315
16	Gesetze und Regulierungen	317
16.1	Spielzeugrichtlinie	317
16.2	DIN EN 71-3; 2017-10	319
16.3	EU AP (89) 1	319
16.4	VERORDNUNG (EG) Nr. 975/2009	320
16.5	Verordnung (EU) Nr. 10/2011	321
16.6	Richtlinie 2002/61/EG (Azo)	324
16.7	RICHTLINIE 2011/65/EU	325

16.8 Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch (LFGB)	325
16.9 BfR IX.	326
16.10 Verpackungsrichtlinie	327
16.11 Gefahrstoffverordnung	328
16.12 CONEG	333
Index	335

Der Autor

Dr. rer. nat. Günter Etzrodt ist Geschäftsführer und Inhaber der Firma Pigments. Consulting UG (haftungsbeschränkt) mit Sitz in Stuttgart. Nach 35-jähriger Tätigkeit bei der BASF SE in leitenden Funktionen in den unterschiedlichsten Arbeitsbereichen des Arbeitsgebiets Pigmente hat er die Firma Pigments.Consulting UG (haftungsbeschränkt) gegründet.

Er berät Pigmentproduzenten, Masterbatcher, Lackfabriken und sonstige Anwender von Pigmenten. Beim Qualitätsmanagement liegen die Schwerpunkte auf der Durchführung interner Audits sowie der Erstellung von „Food-Contact-Zertifikaten“ und Sicherheitsdatenblättern.

Die Beratungsleistungen umfassen Problemlösungen zur Produkt-, Verfahrens- und Prozessentwicklung, der Produktprüfung, der Erstellung von Prüfvorschriften und Produktanalysen. Er berät auch bei Patentfragen und arbeitet die Anmeldeunterlagen von Patenten und Gebrauchsmustern aus.

Die Durchführung technischer Seminare über die Verwendung von Pigmenten und Füllstoffen in Beschichtungen und zur Kunststoffeinfärbung gehört auch zu seinem Leistungsangebot.



Vorwort

Seit der ersten Auflage im Jahr 2002 gab es eine Reihe von Veränderungen bei den Regulierungswerken für die Kunststoffeinfärbung. Mit der Gründung der Europäischen Chemikalienbehörde (ECHA) und der Einführung von REACH wurde die toxikologische Einstufung von Chemikalien, und damit auch von Pigmenten, intensiv überarbeitet. Pigmente und Kunststoffe müssen registriert werden. Auf deutscher und europäischer Ebene gibt es eine Reihe neuer Regulierungen oder Änderungen bestehender Regulierungen, die die Kunststoffeinfärbung betreffen. Die Erstellung und Weitergabe von Sicherheitsdatenblättern ist nun verbindlich. Die vollständige Auflistung der bestehenden Regulierungen befindet sich im Kapitel 16 „Regulierungen“.

Das Buch „Einfärben von Kunststoffen“ von Herrn Dr. rer. nat. Albrecht Müller mit den Kapiteln über die Pigmente und Farbstoffe mit den ausführlichen Produkt- und Verwendungsbeschreibungen einschließlich der Summen- und Strukturformeln stellt die Basis des nun vollständig überarbeiteten Buches dar.

Die Anordnung der Kapitel wurde erneuert, um über das Thema Farbe und die Polymere zu den Pigmenten, den Farbstoffen und den funktionalen Pigmenten zu gelangen. Das Kapitel Füllstoffe wird sehr viel ausführlicher beschrieben. Die Themen Qualitätsmanagement und Umweltmanagement wurden neu erstellt.

Auch die Regelungen über Gefahrenhinweise wurden neu gefasst. Die DIN- und ISO-Normen wurden aktualisiert, neue Normen und Prüfmethode wurden aufgenommen. Die CLP-Verordnung wird ausführlich beschrieben.

Die Diskussion über Nanopartikel und die Methoden, wie diese zu messen sind, ist noch nicht abgeschlossen. Über mögliche kanzerogene Potentiale von Pigmentruß (Carbon Black) und Titandioxid wird diskutiert.

In der Wirtschaft hat es ebenfalls gravierende Veränderungen gegeben. Traditionelle europäische Pigmentproduzenten wurden von anderen Unternehmen übernommen oder aus Konzernen ausgegliedert. Der Kostendruck ist stark gestiegen, chinesische und indische Pigmenthersteller drängen in den Markt – zum Teil mit guten Qualitäten.

Völlig neue Pigment-Grundkörper sind, bis auf zwei neue anorganische orangefarbene Pigmente, seit dem Erscheinen der ersten Auflage im Jahr 2002 nicht auf den Markt gekommen. Die Pigment-Entwicklung konzentriert sich auf die Verbesserung der anwendungstechnischen Eigenschaften der Pigmente, wie Farbstärke, Dispergierbarkeit und Temperaturbeständigkeit sowie auf Variationen bei den Effektpigmenten. Themen wie Wärmemanagement sind hinzugekommen.

Die Kunststoffeinfärbung ist aber weiterhin ein Wachstumsmarkt, so dass sich die Beschäftigung mit diesem Arbeitsgebiet lohnt.

Günter Etzrodt, Juni 2018

1

Einleitung

Farben spielen in unserem Alltag eine große Rolle. Auf Farben reagieren wir verstandesmäßig, zum Beispiel weil wir gelernt haben, nur bei Grün die Straße zu überqueren und bei Rot zu warten. Wir reagieren auf Farben aber auch emotional. So wird die Farbe Rot als warme Farbe empfunden und steht unter anderem für Energie und Wärme, Freude, Leidenschaft und Liebe. Die Farbe Blau hingegen gehört zu den kalten Farben und wird in Verbindung mit Eis, Schnee und Gefühlskälte gesehen. Gleichförmige Gegenstände können durch unterschiedliche Farben verschiedenen Zwecken zugeführt werden.

In diesem Buch wird auf Pigmente, Farbstoffe und Füllstoffe zur Einfärbung von Kunststoffen mit ihren Eigenschaften einschließlich der Verarbeitungsverfahren eingegangen. Bei kritischen toxikologischen Pigmenteigenschaften wird ein Hinweis auf die Einstufung bei der ECHA [7] gegeben.

Obwohl das Einfärben von Kunststoff Stand der Technik ist, können immer wieder Fragen, Probleme oder auch Fehler auftreten. Dies ist bei der Vielzahl an Kunststoffen, Farbmitteln und den spezifischen Anforderungen an die Fertigteile sowie zu beachtenden Gesetzen, Richtlinien bzw. Vorschriften eigentlich nicht verwunderlich. Es kommt hinzu, dass mitunter Forderungen gestellt werden, die systembedingt gar nicht erfüllbar sind.

Die Praxis hat außerdem gezeigt, dass das Wissen der Kunststoffverarbeiter über die komplexen Zusammenhänge bei der Einfärbung von Kunststoffen, bedingt durch die Vielzahl der Pigmente und den Kunststoffen mit unterschiedlichen Verarbeitungseigenschaften begrenzt ist. Andererseits sind auch dem Coloristen verschiedene Produktionsprobleme bei Kunststoffverarbeitung nicht immer geläufig.

Ein intensiver Austausch von Informationen zwischen Kunststoffverarbeiter und Pigment-/Farbpräparationshersteller ist daher nicht nur wichtig, sondern kann gleichzeitig dazu dienen, Missverständnisse zu verhindern oder abzubauen, so dass ein besseres gegenseitiges Verstehen entsteht. Dass dies als Nebeneffekt gleichzeitig für die Qualität der Produkte beider Seiten förderlich ist, braucht sicherlich keine weitere Erläuterung.

In diesem Buch werden die verschiedenen Aspekte der Kunststoffeinfärbung detailliert betrachtet. Im Vordergrund stehen die Farbmittel, die Füllstoffe und die Kunststoffe mit ihren spezifischen Eigenschaften und ihrer gegenseitigen Beeinflussung sowie den unvermeidbaren Auswirkungen auf ihr Eigenschaftsprofil.

Die Farbmittel werden in dem international gebräuchlichen Colour Index gelistet [1]. Aus dieser Bezeichnung ist die Chemie des jeweiligen Farbmittels nicht erkennbar. Diese Kenntnis ist aber für den Coloristen wichtig, weil er aus der Chemie bereits wesentliche Eigenschaften des jeweiligen Farbmittels erkennen kann. Aus diesem Grund wird bei den einzelnen Farbmitteln bewusst auf die Chemie eingegangen. Es werden die Summenformeln und bei den organischen Pigmenten und den Farbstoffen auch die Strukturformeln aufgeführt. Zusätzlich werden die CAS- und die EC-Nummern angegeben, was im betrieblichen Alltag nützlich sein kann.

Wie überall im täglichen Leben, sind auch bei der Kunststoffeinfärbung eine Reihe von Gesetzen und Vorschriften zu beachten. Die Anzahl dieser Regulierungen hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Bedingt durch die intensive toxikologische Forschung der Wirkung von Substanzen auf den menschlichen Organismus werden die Eigenschaften von Farbmitteln neu bewertet. Die Folge kann eine Einschränkung der Verwendung bzw. ein Verwendungsverbot von Substanzen sein. Typische Beispiele hierfür sind die früher viel verwendeten Cadmium- und Bleipigmente sowie eine Reihe von spezifischen Azofarbmitteln (Stichwort „Disazodiarlylpigmente“).

Auf die physikalischen Grundlagen der Farbentstehung, der Farbempfindung und der Farbmessung wird in diesem Buch ebenfalls eingegangen. Da es auf diesem Gebiet bereits eine umfangreiche Literatur [2] [3] [4] [5] gibt, wird dieser Themenkreis jedoch nur punktuell beleuchtet.

Die Verarbeitungstechniken bei der Kunststoffeinfärbung und die Herstellung von Masterbatches und Präparationen werden ebenfalls beschrieben [6].

Literatur zu Kapitel 1

- [1] Color Index: <https://colour-index.com>, Januar 2018
- [2] Etzrodt G.: Die Farbenwelt der Kunststoffe, Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 2003
- [3] Kittel H.: Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen, Band 5: Pigmente, Füllstoffe und Farbmatrik, S. Hirzel Verlag Stuttgart, Leipzig, 2003
- [4] Huff, K.: Visuelle Abmusterung und praktische Farbmessung in der Kunststoffindustrie, Bayer AG, Leverkusen 1993
- [5] Dicke B., Böttner G.: Farbe als Qualitätskriterium – Mehr als ein Seherlebnis, BYK-Gardner, GDCh Wochenschau – Chemie und Licht, 2016
- [6] Farb- und Additiv-Masterbatches in der Praxis, zweite Auflage 2006, Masterbatch Verband im Verband der Mineralfarben-Industrie e. V., Frankfurt am Main, 2006
- [7] ECHA: <https://echa.europa.eu/de/search> for chemicals, Januar 2018

2

Die Begriffe Farbe und Farbmessung

Unzählige Farbvarianten umgeben uns im täglichen Leben. Der Begriff „Farbe“ ist so selbstverständlich, dass man leicht übersieht, welche Rolle die Farbe in unserem Alltag spielt. Obwohl die Farbe unser Leben grundlegend beeinflusst, ist unser Wissen über „Farbe“ und den kontrollierten Umgang mit ihr häufig nicht ausreichend – was beispielsweise zu Problemen bei der Festlegung oder Übermittlung von Produktfarben führen kann. Oft findet die Beurteilung unter Einfluss von persönlicher Empfindung und Erfahrung statt, wodurch eine einheitliche Bewertung unmöglich ist.

Das menschliche Auge nimmt Licht im sichtbaren Bereich wahr. „Licht“ ist aber nicht gleich „Farbe“, sondern zuerst einmal eine elektromagnetische Strahlung, die auf der Netzhaut Nervenreize auslöst und damit das „Sehen“ überhaupt ermöglicht. Die spektral empfindlichen Sinneszellen der Netzhaut geben ihre Signale an das Gehirn weiter, wo aus diesen Informationen der Farbeindruck entsteht. Farbe ist ein Sinneseindruck im menschlichen Gehirn. Sichtbares Licht ist ein kleiner Teilbereich von existierenden elektromagnetischen Wellen. Unterschiedliche Wellenlängen werden als unterschiedliche Farben wahrgenommen. Farbe ist also ein Wahrnehmungsphänomen, das von dem Beobachter und den Bedingungen abhängt, unter denen die Farbe beobachtet wird. Jedoch gibt es für die Bestimmung von Farben keine physikalische Messgröße wie für Länge oder Gewicht.

Für die Wahrnehmung von Farben sind drei Dinge erforderlich [1]:

- ein Objekt
- eine Lichtquelle (Leuchtmittel) und
- ein Beobachter.

Der Farbeindruck wird von dem menschlichen Gehirn erfolgreich für die Objektverfolgung und -erkennung verwendet. Die Farbe eines Objekts ändert sich jedoch, wenn sich die Farbe des Leuchtmittels ändert oder wenn sich das Objekt vor einem andersfarbigen Hintergrund befindet.

Um Farben zu sehen, ist Energie in Form von Licht erforderlich. Um das Phänomen „Farbe“ besser zu verstehen, müssen wir den Ursprung des Lichts erkennen. Licht kommt aus einer Vielzahl von Quellen und besteht aus elektromagnetischer Strah-

lung, einer Form von Energie, die sich in einer Wellenbewegung ausbreitet. Alles sichtbare Licht besteht aus einer Mischung von Farben, die in verschiedenen Anteilen zusammengesetzt sind, um jedes unverwechselbare Licht zu bilden. Die Art, wie wir Licht messen, ist eine spektrale Energieverteilung. In Bild 2.1 beginnt das visuelle Farbspektrum bei 400 nm und endet bei 700 nm. Alles unter 400 nm heißt Ultraviolett (UV) und alles über 700 nm wird als Infrarot (IR) bezeichnet. Das menschliche Auge kann ultraviolettes oder infrarotes Licht nicht wahrnehmen.

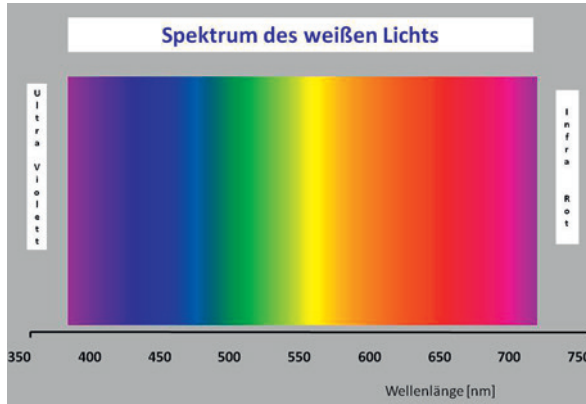


Bild 2.1 Das Spektrum des weißen Lichts

Weißes Licht besteht aus einer Mischung von Farben, welche durch einen bestimmten Wellenlängenbereich gekennzeichnet sind. Das sind die Farben des Spektrums – rot, orange, gelb, grün, blau und violett.

Glühlampe und Lumineszenz sind zwei Möglichkeiten, Licht zu erzeugen. Die Glühlampe erzeugt Licht aus Wärmeenergie. Das Erhitzen des Fadens einer Glühbirne auf eine ausreichend hohe Temperatur führt dazu, dass er leuchtet. Die Lumineszenz, auch bekannt als kaltes Licht, ist Licht von anderen Energiequellen. Es kann bei Raumtemperatur oder noch niedrigeren Temperaturen erzeugt werden. Quantenphysik erklärt Lumineszenz als Bewegungen von Elektronen aus ihrem Grundzustand (niedrigstes Energieniveau) in einen Zustand hoher Energie. Wenn sie in ihren Grundzustand zurückkehren, gibt das Elektron die Energie in Form eines Lichtphotons ab. Wenn das Zeitintervall zwischen den beiden Schritten kurz ist (wenige Mikrosekunden), wird der Prozess Fluoreszenz genannt. Wenn das Intervall lang ist (einige Stunden), heißt der Prozess Phosphoreszenz.

Die Kombination dieser Wellenlängen im Licht kann sich entsprechend der Lichtquelle ändern. Aus diesem Grund können Farben unter dem Einfluss von Tageslicht, Fluoreszenzlicht oder Natriumdampf lampen anders aussehen. Natürliches Sonnenlicht variiert stark. Es kann sehr blau sein, besonders am Mittag in nördlichen Breiten. Direkte Sonneneinstrahlung wird in der Regel als golden gesehen,

aber bei Sonnenuntergang kann es hellrot sein. Künstliches Licht aus Natriumdampflampen ist gelb, aus Quecksilberdampflampen blau-grün, oder aus einer Glühlampe mehr oder weniger gelb.

Mehrere Phänomene können auftreten, wenn das Licht auf ein Objekt trifft. Bei transparenten Objekten gehen die elektromagnetischen Wellen durch das Objekt durch. Bei farblosen Objekten passiert das Licht die Objekte unverändert. Bei farbigen Objekten wird ein Teil der Lichtwellen absorbiert. Die nicht absorbierten Lichtwellen werden vom menschlichen Auge als Farbe wahrgenommen.

Bei mehr oder weniger deckenden Objekten wird ein Teil der Lichtwellen absorbiert, der verbleibende Teil reflektiert. Bei einem blauen Objekt wird beispielsweise der rote Anteil des Farbenspektrums absorbiert. Den reflektierten blauen Anteil nimmt das menschliche Auge dann als blaue Farbe wahr. Die Reflexionskurve von Weiß zeigt in allen Wellenlängen des Spektrums annähernd gleiche Intensitäten nahe 100 % Reflexion.

Brechung oder Streuung bedeutet, das Licht die Richtung ändert, wenn es von einem Medium zum anderen übergeht, wie vom Polymer zu einem Pigment oder Füllstoffpartikel in einem Kunststoffteil. Die Streuung wird durch den Brechungsindexunterschied zwischen einem Partikel und seiner Umgebung, der Partikelgröße und der Wellenlänge des Lichts beeinflusst. Eine opake Farbe sorgt für eine hohe Streuung. Eine lichtdurchlässige Farbe zeigt eine Kombination aus Reflektion und Streuung. Die Absorption erfolgt, wenn die meisten Wellenlängen des sichtbaren Spektrums absorbiert werden. Schwarze Objekte absorbieren fast alles Licht.

Ein Objekt erscheint in einer bestimmten Farbe, weil das Licht, das von seiner Oberfläche reflektiert wird, genau aus Wellenlängen besteht, die kombiniert werden, um die beobachtete Farbe zu erzeugen. Das Objekt absorbiert alle anderen Wellenlängen. Zum Beispiel reflektiert ein blaues Objekt das blaue Lichtspektrum, absorbiert aber rot, orange, gelb, grün und violett, die die meisten anderen Wellenlängen sind. Ein rotes Objekt reflektiert das rote Spektrum, absorbiert aber das meiste orange, gelb, grün, blau und violett.

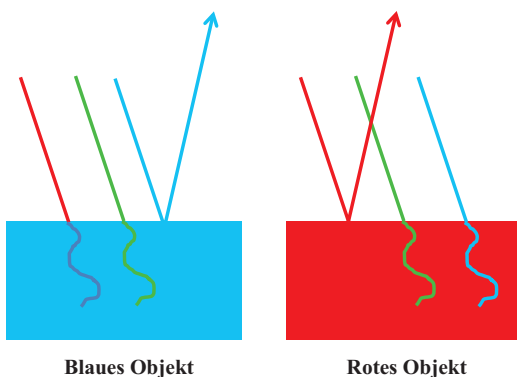


Bild 2.2
Reflektion und Absorption von Farben

Schwarze und weiße Farben sind anders als andere Farben in Bezug auf die Art und Weise, wie sie Licht reflektieren und absorbieren. Ein weißer Gegenstand reflektiert fast alle Farben, während ein schwarzer Gegenstand die meisten Farben vollständig absorbiert.

Weitere wesentliche Einflüsse auf die Farbe eines Objekts sind Form- und Oberflächeneffekte. Zum Beispiel kann ein Objekt sphärisch oder quadratisch, stumpf oder glänzend, transparent, opak oder lichtdurchlässig sein. Es kann auch metallisch, perlmutt, fluoreszierend oder phosphoreszierend erscheinen. Betrachtungswinkel beeinflussen auch unsere Farbwahrnehmung.

Das menschliche Auge ist der definierende Beobachter der Farbe. Ein Beobachter baut fast immer die Akzeptanz einer Farbe auf ein visuelles Urteil. Aus diesem Grund kann eine Farbabstimmung sehr subjektiv werden, da die Farbsicht von Person zu Person sehr unterschiedlich ist. Charakteristika wie Alter, Geschlecht, ererbte Eigenschaften und sogar Stimmungen können die Farbsicht beeinflussen. [2]

■ 2.1 Grundlagen der Farbmessung

Menschen, die glauben, dass das Auge der wichtigste Beobachter der Farbe ist, argumentieren, dass die Beurteilung der Farbe rein durch Bezugnahme auf Farbkarten durch visuelle Anpassung möglich ist. Da jede Person die Farbe aber unterschiedlich wahrnimmt, ist diese Methode sehr subjektiv und eignet sich nicht für eine objektive Beurteilung.

Neben genetischen Anomalien ändert sich das Farbsehen mit dem Alter durch den Aufbau der gelben Makula-Pigmentierung im Auge. Aus diesem Grund wird argumentiert, dass alle Ursprungsfarben auf physikalischen Messungen beruhen müssen. Allerdings müssen diese Messungen und ihre Interpretation eng mit den Reaktionen der visuellen Beobachter zusammenhängen.

Daher ist die Farbkontrolle in zwei Segmente aufgeteilt: visuell und instrumental. Folgend wird das Farbmessverfahren nach der CIELAB-Methode einschließlich der Messung mit einem Spektralphotometer beschrieben. [3]

2.1.1 Spektralphotometer

Eine Methode zur Farbmessung ist das spektralphotometrische Verfahren. Spektralphotometer messen die spektrale Charakteristik des Lichts und errechnen daraus die Normfarbwerte auf der Grundlage der CIE-Normalbeobachterfunktionen. Zusätzlich zu den numerischen Ergebnissen in verschiedenen Farbsystemen erlauben Spektralphotometer die direkte grafische Darstellung der spektralen Eigen-

schaften der Objektfarbe. Farben entstehen durch Mischen der verschiedenen Wellenlängen in bestimmten Anteilen. Ein Spektralphotometer bewertet das vom Objekt zurückgeworfene Licht für verschiedene Wellenlängen oder Wellenlängenbereiche und kann die Resultate als Grafik darstellen.

Zur Messung wird das sichtbare Spektrum in kleine, eng begrenzte Wellenlängenbereiche zerlegt, die jeweils von einem anderen Segment des Sensors (z. B. 39 Segmente) bewertet werden. Mit diesem Verfahren lassen sich kleinste Farbunterschiede feststellen, die dem menschlichen Auge verborgen bleiben.

2.1.2 CIELAB-Methode

Die Kommission Internationale de l'Eclairage (CIE) hat bestimmte Standardwerte festgelegt, die weltweit zur Farbmessung verwendet werden.

Die von CIE verwendeten Werte heißen L^* , a^* und b^* und die Farbmessmethode heißt CIELAB.

- L^* stellt die Differenz zwischen Licht (wobei $L^* = 100$) und Dunkel (wobei $L^* = 0$) ist.
- A^* steht für die Differenz zwischen grün ($-a^*$) und rot ($+a^*$) und
- b^* stellt die Differenz zwischen Gelb ($+b^*$) und Blau ($-b^*$) dar.

Bei diesem System entspricht eine beliebige Farbe einer Stelle auf dem in Bild 2.3 dargestellten Graphen. Variablen von L^* , a^* , b^* oder E^* werden als ΔL^* , Δa^* , Δb^* oder ΔE^* dargestellt ($\Delta E^* = \Delta L^*^2 + \Delta a^*^2 + \Delta b^*^2$). Es repräsentiert die Größe der Farbunterschiede, zeigt aber nicht die Richtung der Farbdifferenz an.

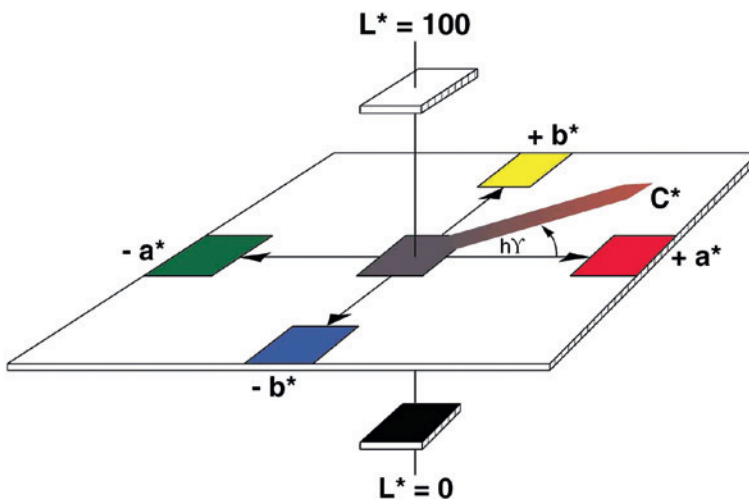


Bild 2.3 CIELAB-Koordinatensystem [1]

Bei der Farbmessung sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Ist das Messgerät kalibriert („justiert“), Weiß-/Schwarzstandard sauber?
- Sind die Werte des aktuellen Standards korrekt?
- Wurde das Messgerät mit einer bunten Referenzprobe kalibriert?
- Die ISO 9001 verlangt eine Prüfmittelüberwachung!
- Ist die Probe durchscheinend? => Untergrund!
- Ist die Probe/der Untergrund fluoreszierend?
- Randeffekte bei dicken Kunststoffproben sind zu beachten!
- Soll die Pigmentierung oder das visuelle Erscheinungsbild der Lackierung charakterisiert werden?
- Ist die Probe matt/glänzend?

Zu berücksichtigen bei der Farbauswertung sind:

- Welche Lichtart/Normalbeobachter liegt vor?
- Welche Messgeometrie/Messgerät wird verwendet?
- $L a b$ oder $L^* a^* b^*$?
- DE^* oder z. B. $DE(CMC)$?
- Farbstärke-Auswertungen: Welche Methode („Gleichheitskriterium“)?
- Deckvermögen: Welche Methode?

2.1.3 Einflüsse der Probenbeschaffenheit und Temperatur bei der Farbmessung [3]**Pulver/Granulate**

Bei der Messung von Pulvern mit einem Spektrophotometer ist der Messwert von der Verdichtung und der Oberfläche abhängig. Um Fehler zu vermeiden, müssen einige Punkte beachtet werden. Die Behälter (z. B. Glasküvetten) müssen immer desselben Typs, die Füllhöhe und Verdichtung des Pulvers konstant und die Oberfläche glatt und vergleichbar sein. Bei hoher Korngröße wird empfohlen, ein Spektrophotometer mit einer großen Messöffnung zu verwenden. Die Messoberfläche wird dadurch gemittelt mit dem Ergebnis reproduzierbarer Messwerte.

Halbtransparente Materialien

Bei halbtransparenten Materialien geht das Licht teilweise durch die Schicht und wird vom Hintergrund mehr oder weniger reflektiert. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass der Hintergrund einen großen Einfluss auf das Messergebnis haben kann. Durch Erhöhung der Schichtdicke kann dieser Einfluss minimiert werden. Auch sorgt ein opakes weißes Hintergrundmaterial für konstante Ergebnisse.

Materialien mit Oberflächenstruktur

Oberflächen mit Struktur und Mustern führen bei kleiner Messöffnung zu schlecht reproduzierbaren Messergebnissen. Deshalb sollte die größtmögliche Messblende verwendet werden. Über eine Mehrfachmessung an verschiedenen Orten der Oberfläche und eine anschließende Mittelwertbildung lässt sich die Messgenauigkeit deutlich erhöhen.

Einfluss der Temperatur

Bei manchen Materialien hat eine Temperaturänderung auch eine Änderung der Farbe zur Folge. Dieses Phänomen wird als Thermochromie bezeichnet. Zur Durchführung genauer Farbmessungen müssen Proben und Messgerät eine konstante definierte Temperatur aufweisen, am besten durch Aufbewahrung in einem Raum mit konstantem Klima.

Literatur zu Kapitel 2

- [1] Dicke B., Böttner G.: Farbe als Qualitätskriterium – Mehr als ein Seherlebnis, BYK-Gardner, GDCh WochenschauswsChemie und Licht, 2016
- [2] Etzrodt G.: Kompendium Pigmente und Harze, Pigments.Consulting UG (haftungsbeschränkt), Stuttgart 2011, unveröffentlicht
- [3] <https://www.konicaminolta.eu/de/messgeraete/lernzentrum/farbmessung-glanzmessung/exakte-farbkommunikation.html>, 2017

■ 3.1 Entwicklungsgeschichte

Die wissenschaftliche und technische Entwicklung der Kunststoffe begann 1838 mit der Entdeckung des Polyvinylchlorids durch Victor Regnault. Der Name dieses damals neuen Arbeitsgebiets wurde von R. Escales im Jahr 1911 mit der Erstveröffentlichung der Zeitschrift „Kunststoffe“ begründet. Den Begriff „Makromolekül“ führte 1922 Hermann Staudinger ein. Tabelle 3.1 gibt einen kurzen geschichtlichen Überblick über die wichtigsten Entwicklungsschritte im Bereich der Kunststoffforschung und der Kunststofftechnik. In Tabelle 3.3 sind die wichtigsten synthetischen Kunststoffe aufgelistet.

Polymere bestehen aus Kettenmolekülen, die durch Verknüpfung von kleineren Bausteinen, den Monomeren, aufgebaut werden. Diese können natürlichen Ursprungs sein, wie z. B. die Cellulose, oder durch chemische Synthese, wie z. B. das Polystyrol, hergestellt werden. Die Eigenschaften der Polymere beruhen sowohl auf der Länge der Molekülketten als auch auf dem chemischen Aufbau. Das Prinzip des Aufbaus langer Molekülketten gilt sowohl für natürliche als auch für synthetische Polymere. Die Molekülstrukturen werden beispielhaft mit den beiden Strukturformeln aufgezeigt:

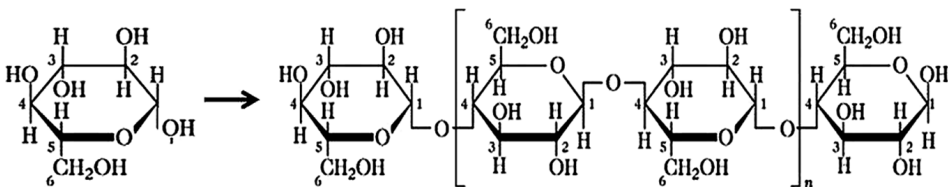


Bild 3.1 Aus Monosaccharid wird Cellulose

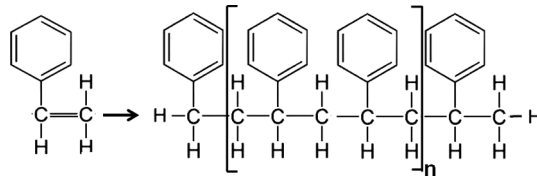


Bild 3.2 Polystyrol aus Styrol-Monomer durch Polymerisation

Bei der Monomerverknüpfung unterscheidet man zwischen Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition. Die Zahl der Wiederholungseinheiten in einem Makromolekül bezeichnet man als Polymerisationsgrad.

Polymere, die nur aus einer Sorte von Wiederholungseinheiten aufgebaut sind, bezeichnet man als Homopolymere.

Der Einbau chemisch verschiedener Monomere führt zu Copolymeren. Liegen zwei unterschiedliche Monomere vor, erhält man alternierende, statistische oder blockartige Strukturen. Neben linearen Ketten gibt es auch verzweigte und vernetzte Systeme. Auf diesen unterschiedlichen molekularen Architekturen beruht die Vielfalt der polymeren Werkstoffe.

Kunststoffe lassen sich in zwei wichtige Gruppen unterteilen: durch Wärme verformbare Thermoplaste und durch Wärme nicht verformbare Duroplaste. Der gravierende Unterschied beruht auf dem Verhalten des Kunststoffs während der Formgebung.

Wenn ein Thermoplast erwärmt und in eine Form gepresst wird, erfolgt keinerlei chemische Reaktion. Nachdem der Kunststoff in der Form erkaltet und hart geworden ist, könnte er durch neues Erhitzen wieder in eine neue Form gebracht werden, ohne dass sich die Charakteristiken des Kunststoffs spürbar verändern.

Duroplaste hingegen verändern sich chemisch, während sie in die endgültige Form gebracht werden. Sie reagieren mit einer Polykondensation und vernetzen zu einem räumlichen Gitter. Dieses Aushärten mittels Strukturveränderung des Moleküls ist nicht umkehrbar. Wenn ein Duroplast einmal geformt worden ist, kann er nicht mehr verändert werden.

Die nachfolgende Darstellung gibt eine Übersicht über die synthetischen Polymere [6]:

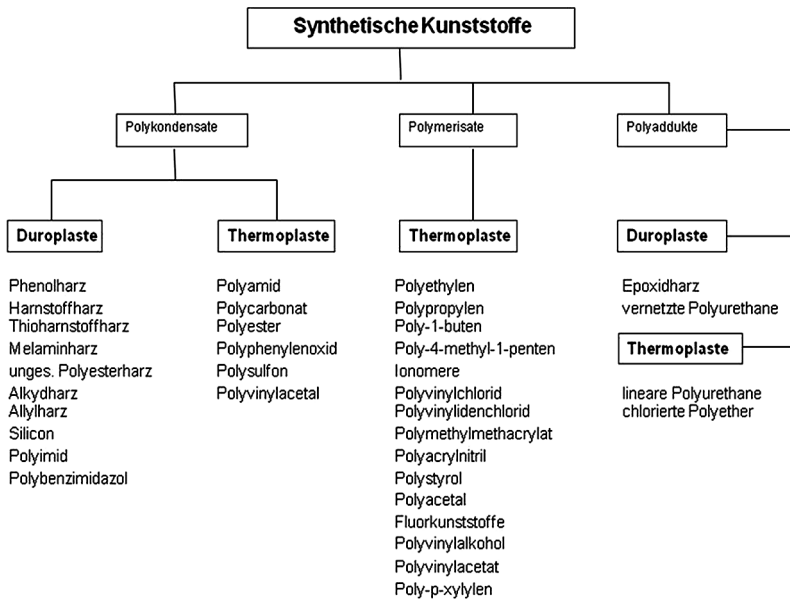


Bild 3.3 Übersicht über die synthetischen Polymere

Tabelle 3.1 Die Entwicklungsgeschichte der Kunststoffe

Jahr	Entdecker	Entdeckung
1838	Victor Regnault	Polyvinylchlorid im Labormaßstab
1839	Charles Nelson Goodyear	Vernetzbarkeit des Kautschuks mit Schwefel
1846 bis ca. 1900		Entwicklung von Cellulose-Kunststoffen
1901	Otto Röhm	erste Arbeiten über Acrylsäure und Acrylsäureestern
1912	General Electric	Patentierung der ersten Alkydharze
1928	Otto Röhm	Herstellung von Polymethylmethacrylat
1928	E. Konrad	Entwicklung von Buna S, dem ersten synthetischen Allzweck-Kautschuk
1928	H. Hopf	technische Herstellung des Caprolactams
1930 bis 1933	IG-Farbenindustrie	Produktionsaufnahme von Polystyrol, Polyacrylnitril, Polyisobutyle, Polyvinylchlorid und Polyethylenoxid
1933	E. W. Fawcett und R. O. Gibson	Hochdruckpolymerisation von Etylen zu PE-LD
1933 bis 1939	ICI	Ausarbeitung der technischen Grundlagen zur Großproduktion von Polyethylen
1935 bis 1938	Wallace Hume Carothers, Du Pont	Herstellung des ersten Polyamid 66 (Nylon), Produktionsaufnahme von Nylon
1938	P. Schlack IG-Farbenindustrie	Herstellung des ersten Polyamid 6 (Perlon), Produktionsaufnahme von Perlon
1940	O. Bayer	Verfahren zur Herstellung von Polyurethan

Tabelle 3.1 Die Entwicklungsgeschichte der Kunststoffe (*Fortsetzung*)

Jahr	Entdecker	Entdeckung
1946	J. R. Winfield und J. T. Dickson	Entdeckung der gesättigten Polyester als Faserrohstoff, Produktion bei ICI und Du Pont
1946	US-Rubber Co.	erste ABS-Kunststoffe
1953	K. Ziegler	Niederdruckpolymerisation von Ethylen mit metallorganischen Katalysatoren
1953	Hermann Schnell	Entdeckung der Polycarbonate
1957	Hoechst AG	Produktionsaufnahme von Polypropylen
1965	Shell	Blockcopolymere aus Styrol und Polyolefinen
1967	Dynamit Nobel AG	technische Herstellung von glasklarem Polyamid
1973	Dynamit Nobel AG	Produktionsaufnahme von Polyvinylidenfluorid
ab 1973		Entwicklung von Spezialkunststoffen wie Polyarylether, Polyarylsulfonen, Polyphenylsulfid, Polyethersulfon, Polyetherimid, Polyimidsulfon und vor allem von thermoplastischen Copolymerisaten

■ 3.2 Thermoplastische Polymere

Bei der Kunststoffverarbeitung spielen die thermoplastischen Polymere die wirtschaftlich größte Rolle, da sie sich ohne wesentliche Zersetzung bei höheren Temperaturen schmelzen und verformen lassen. Sie besitzen zwar nach ihrer Herstellung die meisten erforderlichen werkstofftechnischen Eigenschaften, für viele Verwendungszwecke ist aber eine Einfärbung vorteilhaft bzw. zur Kennzeichnung zwingend notwendig. Die thermoplastischen Polymere zeigen folgende Eigenschaften:

Tabelle 3.2 Eigenschaften thermoplastischer Polymere

Naturzustand	<ul style="list-style-type: none"> ▪ transparent bis beige opak ▪ werkstofftechnische Eigenschaften weitgehend vorhanden
Einfärbung	je nach Verwendung vorteilhaft bis zwingend notwendig (z. B. Elektrokabel)
Kennzeichnend	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hochviskose Konsistenz oberhalb des Erweichungspunkts ▪ Abnahme der Viskosität bis zum Zersetzungspunkt ▪ Erhärtung nach Abkühlung
Thermoplastizität	wird zum Bearbeiten der Kunststoffe durch Spritzgießen, Extrudieren, Blasen und auch Schweißen genutzt
Schädigung	bei jedem Bearbeitungsvorgang tritt eine mehr oder minder große Schädigung des Werkstoffs ein

Bei ungünstigen Bearbeitungsbedingungen kann es nach der Umformung von Polymeren zu Kristallisationseffekten kommen. Kristallisationskeime können auch Pigmente sein. Dadurch kann sich das fertige Werkstück in der Form verändern („Verzug“). Die Folge kann sein, dass sich Getränkekästen nicht mehr stapeln lassen oder bei Mülltonnen der Deckel nicht mehr auf die Tonne passt.

Die Thermoplastizität der Kunststoffe wird zum Bearbeiten derselben durch Spritzgießen, Extrudieren, Blasformen und auch Schweißen genutzt.

Die *Vorteile* der polymeren Werkstoffe sind:

- niedriges spezifisches Gewicht
- hohe Beständigkeit gegen Korrosion und Verrottung
- hohe elektrische Isolierfähigkeit
- Wärmeschutzwirkung und Dämmwirkung gegen Schall
- leichte Formgebung
- wegen wirtschaftlicher Verarbeitbarkeit idealer Werkstoff für die Massenfertigung
- leicht einzufärben, zu bedrucken und zu metallisieren
- breites Angebot an preiswerten Rohstoffen

Diesen positiven Eigenschaften stehen folgende *Nachteile* gegenüber:

- meist nur geringe mechanische Festigkeit
- geringe Wärmestandfestigkeit
- Beeinträchtigung der physikalischen Eigenschaften unter der Einwirkung von Licht und Wärme
- die meisten Polymere sind brennbar
- teure Abfallbeseitigung
- unwirtschaftliche Reparierbarkeit
- begrenzte Maßhaltigkeit, Neigung zur Nachschwindung und zum Kriechen

3.2.1 Chemische Zusammensetzung und Materialeigenschaften

3.2.1.1 Polyvinylchlorid

Die Herstellung von Polyvinylchlorid (PVC) erfolgt großtechnisch nach den Emulsions-, Suspensions- und Masse-Polymerisations-Verfahren. PVC ist schwer entflammbar und sehr chemikalienbeständig. Sein Erweichungspunkt liegt bei 75 °C bis 80 °C. Die Verarbeitung ist durch Kalandrieren, Extrudieren und Blasformen relativ leicht möglich, wobei das PVC in der Regel, z. B. durch umweltfreundliche Calcium-Zink-Stabilisatoren, stabilisiert werden muss. Zum Spritzgießen muss PVC mit niedriger Molmasse (kleiner K-Wert, leichtfließend) eingesetzt werden.

PVC wird als PVC-u (unplasticized), als weichmacherhaltiges PVC-p (plasticized), als Copolymer des Vinylchlorids mit Vinylacetat und als schlagzähe Formmasse durch Mischung von PVC mit kautschukartigen Komponenten hergestellt. PVC-u lässt sich kleben und schweißen und wird zu Rohren, Fittings, Fensterrahmen, Fassadenverkleidungen usw. verarbeitet. PVC-p dient als Grundstoff für Folien, Fußbodenbeläge, Schläuche, Kabelisierungen, Kunstleder usw. und eignet sich besonders gut zum Hochfrequenzschweißen.

3.2.1.2 Polyolefine

Als Polyolefine werden alle Polymere aus Olefinen bezeichnet, wie Polyethylen, Polypropylen, Polybuten-1 und Polyisobutylen. Diese besitzen gute mechanische Eigenschaften, sind gut verarbeitbar, chemikalienbeständig sowie vielseitig verwendbar und weisen ein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis auf.

3.2.1.3 Polyethylen

Polyethylen wird durch Polymerisation von Ethylen nach unterschiedlichen Verfahren hergestellt. Seine Eigenschaften werden wesentlich durch die Molmasse, die Molmassenverteilung und den Verzweigungsgrad bestimmt. Die Dichte und der Schmelzpunkt steigen mit dem kristallinen Anteil des Polyethylens, wobei dieser umso höher liegt, je geringer der Verzweigungsgrad der Molekülketten ist. Das gehandelte Polyethylen wird nach seiner Dichte in PE-LD, PE-LLD und PE-HD unterschieden, wobei sich die Dichte insgesamt zwischen $0,91 \text{ g/cm}^3$ und $0,97 \text{ g/cm}^3$ bewegt.

Polyethylene niedriger Dichte können in Hochdruckverfahren (PE-LD) oder Niederdruckprozessen (PE-LLD) hergestellt werden. Der Einsatz von Metallocen-Katalysatoren hat in den letzten Jahren eine weitere Verbesserung der Produkteigenschaften in beiden Verfahrensvarianten gebracht.

3.2.1.4 Polypropylen

Der größte Teil des Polypropylens (PP) wird nach dem Gasphasenprozess unter Einsatz von Metallocen-Katalysatoren hergestellt, die auf die gewünschten Produkteigenschaften maßgeschneidert werden. PP wird im Verpackungssektor (Folien), im textilen Bereich für Fasern und Bändchen und im technischen Bereich (Fahrzeugbau, Elektrotechnik/Elektronik, Halbzeuge) eingesetzt. Es ist eine Vielzahl von PP-Produkten auf dem Markt, die sich unter anderem in Fließfähigkeit, Transparenz, Kratzfestigkeit, Biege-E-Modul, Flexibilität, Witterungsbeständigkeit, Wärmeformbeständigkeit, Steifigkeit, Härte, Zähigkeit und Schmelzpunkt unterscheiden. Hochkristalline PP-Produkte (HCPP) schließen die Lücke zwischen unverstärktem und mit mineralischen Fasern oder Plättchen verstärktem PP. Leichtfließende Produkte werden vorwiegend im Spritzguss eingesetzt.

3.2.1.5 Styrolpolymere und Styrol-Copolymerisate

Polystyrol (PS) ist das thermoplastische Polymer des Styrols ($C_6H_5-CHCH_2$) und wird technisch überwiegend radikalisch in Suspension polymerisiert. PS ist glasklar, steif, ziemlich spröde und gegen Säuren, Laugen, Alkohol und Mineralöl beständig, jedoch gegen die meisten Lösungsmittel unbeständig bis löslich. Es ist preisgünstig, ausgezeichnet verarbeitbar und vielseitig verwendbar. Zur Verbesserung der Sprödigkeit, Schlagzähigkeit und Lichtempfindlichkeit des Standard-PS wird vor der Polymerisation des Styrols eine Lösung von Polybutadienkautschuk in Styrol zugesetzt. Da beide Polymere nicht mischbar sind, entsteht bei entsprechender Reaktionsführung eine Polystyrolphase, in die kleine Teilchen des gepfropften Kautschuks eingebettet sind. Entscheidend für die mechanischen Eigenschaften des schlagzähen Polystyrols (HIPS, High Impact PS) sind die Menge des verwendeten Kautschuks sowie Struktur und Größe der Teilchen des Pfropfpolymeren.

Eine weitere Eigenschaftsveränderung lässt sich durch Copolymerisation des Styrols mit Acrylnitril (SAN), mit Acrylnitril und Butadien (ABS) oder mit Acrylnitril und Acrylester (ASA) erreichen. SAN besitzt eine hohe Festigkeit und Härte sowie eine gute Wärmeformbeständigkeit. ABS ist besonders schlagzäh, jedoch wegen des Butadiengehalts nur bedingt alterungsbeständig. ASA ist ebenfalls besonders schlagzäh, aber witterungsbeständiger als ABS. Die Produkte werden in Haushalts- und Konsumartikeln sowie in anspruchsvollen technischen Teilen eingesetzt.

3.2.1.6 Acrylharze

Acrylharze ist der Sammelname für Polymerisate der Acrylsäure und Methacrylsäure sowie der entsprechenden Nitrile, Ester, Amide usw. Der bekannteste Acrylharztyp ist das thermoplastische Poly(methylmethacrylat) (PMMA). Es wird mittels radikalischer Polymerisation in Masse-, Lösungs-, Suspensions- und Emulsionsverfahren hergestellt. Methacrylate verfügen über eine breite Eigenschaftspalette. Die hervorragende Lichtdurchlässigkeit, verbunden mit geringem Gewicht und großer Flexibilität in der Verarbeitung sowie besonders guter Witterungsbeständigkeit, trägt wesentlich dazu bei, dass dieser Werkstoff vielseitig eingesetzt werden kann, z. B. in der Bauverglasung, im Lichtwerbesektor und im Kraftfahrzeugbau. Neben Standard-PMMA werden auch schlagzähe Formmassen hergestellt.

3.2.1.7 Polyamide

Seide und Wolle sind natürliche Polyamide (PA). Technische thermoplastische PA sind am besten als „Nylon“ (PA 66) und als Perlon (PA 6) bekannt. PA werden nach der Zahl der Kohlenstoffatome ihrer Monomere bezeichnet: PA 6 = Polycaprolactam, PA 66 = Polykondensationsprodukt aus Hexamethyldiamin und Adipinsäure

(DIN 16773 T1). PA sind teilkristallin, die gebräuchlichen PA schmelzen zwischen 200 °C und 260 °C. Charakteristisch ist der enge Schmelz- und Erstarrungsbereich. Polyamide werden hauptsächlich zu Fasern verarbeitet und für technische Teile in der Elektroindustrie und im Fahrzeugbau eingesetzt. Durch Zusätze von Elastomeren wird die Schlagzähigkeit erhöht. Glasfasern und mineralische Füllstoffe erhöhen die Festigkeit und reduzieren die Wärmeausdehnung. PA sind gegen Laugen, viele Lösungsmittel, Kraftstoffe und Öl beständig, werden aber von Säuren angegriffen. Für höchste mechanische, thermische und Medienbeanspruchung sind teilaromatische Polyamide (PPA) geeignet.

3.2.1.8 Polycarbonate

Polycarbonate (PC) sind lineare thermoplastische Polyester und Polykondensationsprodukte der Kohlensäure mit Diolen, z. B. Dioxydiphenylalkanen. Ausgangsprodukte sind z. B. Bisphenol A (4,4-Dihydroxy-phenyl-2,2-propan) und Phosgen. PC sind sehr lichtdurchlässig, mechanisch stabil, wärmeformbeständig und elektrisch sehr gut isolierend. Neben Einsatzgebieten in der Elektrotechnik und dem Fahrzeugbereich (Scheinwerferscheiben) werden erhebliche Mengen zu Laseroptisch lesbaren Datenträgern (CD) verarbeitet. Für technische Anwendungen im Fahrzeugbereich werden PC auch zu Blends verarbeitet (z. B. ASA/PC oder ABS/PC).

3.2.1.9 Sonstige thermoplastische Kunststoffe

Da die ausführliche Behandlung aller Kunststoffe den Rahmen dieses Buches sprengen würde, sollen noch einige wichtige Kunststoffe an dieser Stelle genannt werden:

- ABS – Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisate
- ASA – Acrylnitril-Styrol-Acrylester
- SAN – Styrol-Acrylnitril-Copolymere
- PET – Polyethylenterephthalat
- PBT – Polybutylenterephthalat
- POM – Polyoxymethylen
- PUR – Polyurethan

Tabelle 3.3 Einsatzgebiete von marktüblichen Kunststoffen

PE (Polyethylen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Folien (Tragetaschen, Säcke etc.) ▪ Hohlkörper ▪ Flaschenkasten ▪ Spielwaren ▪ Kabel ▪ Rohre
PP (Polypropylen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Haushaltsartikel (Rührschüssel) ▪ Spielwaren ▪ Flaschenkästen (nur im Ausland) ▪ verstreckte Webbändchen (Säcke, Netze) ▪ Fasern
PS (Polystyrol)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elektroindustrie (Spulenkörper, Leuchtenabdeckung, Tonband und Filmspulen) ▪ Haushaltsgegenstände (Frischhaltebecher, Partygeschirr, Kühlschränke) ▪ Spielwaren ▪ Büroartikel ▪ Teile ohne große mech. Beanspruchung
SB (Styrol-Butadien)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elektroindustrie (Fernsehrückwände Verteilerdosen, Phonogehäuse) ▪ Kleiderbügel ▪ Tiefziehverpackungen f. Milchprodukte ▪ Verpackung von Eier ▪ Trinkbecher für Automaten ▪ Maschinengehäuse ▪ Spielwaren
SAN (Styrol-Acryl-Nitril)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elektroindustrie (Abdeckhauben, Haushaltsmaschinen) ▪ Dosen, Kaffeefilter ▪ Scheinwerfergehäuse ▪ Blink und Rückleuchtenabdeckung
ABS (Acryl-Butadien-Styrol)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maschinengehäuse ▪ Staubsaugergehäuse, Küchenmaschinen, Telefongehäuse ▪ Autoindustrie (Frontspoiler, Kühlergrill, Handschuhkästen)
ASA (Acrylnitril-Styrol-Acryl-kautschuk)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkehrsampeln ▪ Hinweisschilder ▪ Heißwasserabflussrohre ▪ Gartenmöbel, Bootsschalen
PPO (Polyphenylenoxid)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hochtemperaturfeste Kunststoffteile (> 200 °C)
PA (Polyamid)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fasern ▪ techn. Artikel (Zahnräder, Spulenkörper) ▪ Maschinengehäuse
PAN (Polyacrylnitril)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fasern

Tabelle 3.3 Einsatzgebiete von marktüblichen Kunststoffen (*Fortsetzung*)

PC (Polycarbonat)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Babyflaschen ▪ medizinische Geräte ▪ maßhaltige hochfeste technische Geräte
PMMA (Polymethylmethacrylat) Plexiglas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Glasersatz ▪ Fahrzeugverglasungen ▪ Duschkabinen ▪ Lupen ▪ Sonnenbrillengläser
POM (Polyoxymethylen) Polyacetal	<ul style="list-style-type: none"> ▪ für mech. beanspruchte Teile (Lager, Zahnräder) ▪ <i>Nachteil:</i> zum Teil kann Formaldehyd abgespalten werden
CAB (Celleuloseacetobutyrat)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Brillengestelle ▪ Koffergriffe ▪ Teile die der Witterung ausgesetzt sind (Reklameschilder)
CA Celluloseacetat (Acetylcellulose)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kabelummantelungen ▪ Formteile (Brillen) ▪ Folien, Fotofilme, Kunstseide (Acetatseide) ▪ Rohre, Flaschen ▪ Lichtkuppeln
PTFE (Polytetrafluorethylen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pfannenbeschichtung ▪ Metallbeschichtung (niedriger Reibungs-Koeffizient)
PUR (Polyurethan) – thermoplastisch	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Skistiefel ▪ technische Teile
PUR (Polyurethan) – physikalisch trocknend	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beschichtungen ▪ Knautschlack ▪ Kunstleder
PUR (Polyurethan) Schäume	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sitze ▪ Matratzen ▪ Armlehnen ▪ Nackenstützen
UP (ungesättigte Polyester) Harze	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bootsbau ▪ Karosseriebau ▪ Behälter, Tanks ▪ Möbel (Sitzschalen)
PETP (Polyethylenterephthalat)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fasern (Diolen, Trevira) ▪ Getränkeflaschen
PVC (Polyvinylchlorid) Hart	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Profile, Kabelkanäle, Dachrinnen ▪ Becher (Verpackung für Lebensmittel) ▪ Flaschen (Öl, Essig)
PVC (Polyvinylchlorid) Weich	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dekorfolien, Möbelfolien (Furnierersatz) ▪ Schläuche ▪ Fußbodenbeläge ▪ Ringbücher, Ordner, Hüllen

Ein wesentliches Kriterium bei der Einfärbung von Kunststoffen ist die Verarbeitungstemperatur des betreffenden Kunststoffes (Bild 3.4). Die Verarbeitungstemperaturen beim Spritzgießen bzw. Blasformen reichen von ca. 160 bis 200 °C beim PVC, über ca. 200 bis 250 °C beim PE bzw. 250 bis 290 °C beim PA 6 bis hin zu ca. 320 bis 340 °C beim PSU.

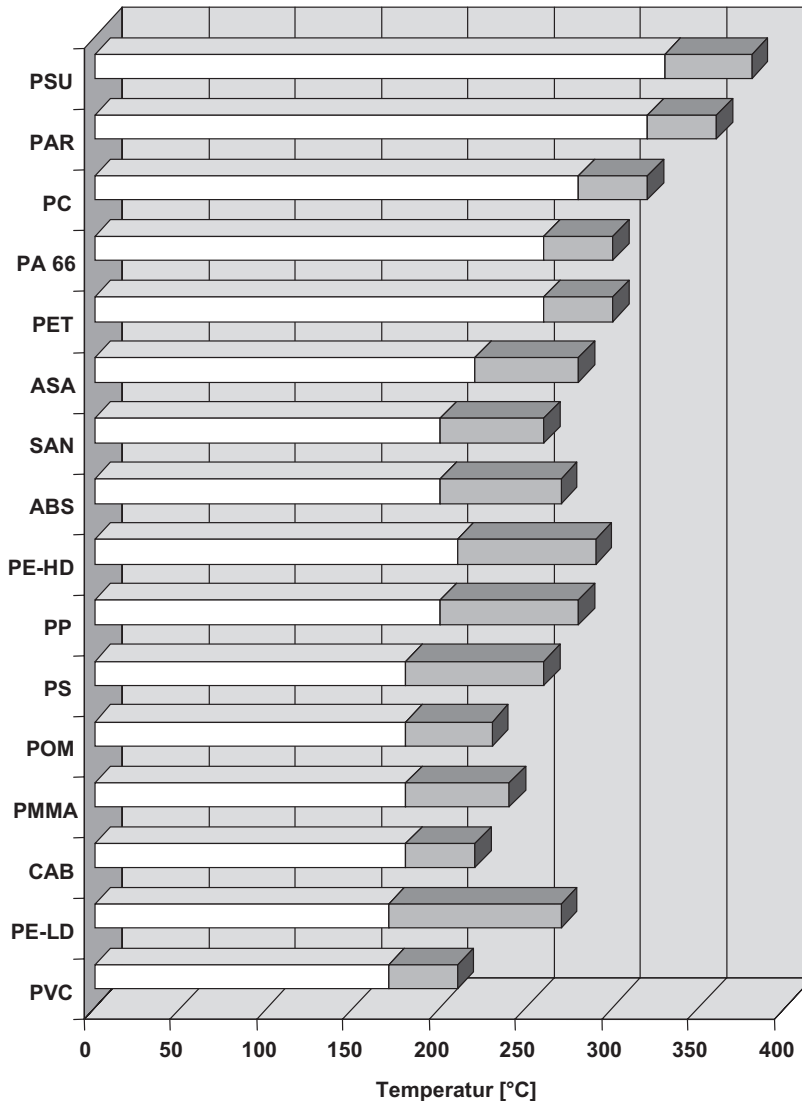


Bild 3.4 Verarbeitungstemperaturen diverser Kunststofftypen