

■ 1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Motivation für dieses Buch liegt darin begründet, dass maßgeschneiderte Produkte heutzutage mehr denn je gefordert sind und hier vor allem die optischen Eigenschaften der Produkte zunehmend in den Vordergrund treten. „Optik wird immer wichtiger“ oder „Kunststoffe werden zu emotionalen Trägern“ steht in den Überschriften vieler Messeberichte [1] [2] [3]. Die Schlagzeilen sind also sehr deutlich geprägt von Design, Optik, Farbe, Selbsteinfärben, Masterbatches oder Effektfarben. Selbst große Rohstoffhersteller wie die BASF beschäftigen sich in zunehmendem Maße mit der Thematik. So haben sich neben neuen Produkten auch Serviceleistungen rund um das Thema Farbe bzw. Einfärben zu Themen mit allgemein anerkannt hoher Bedeutung entwickelt.

Für den Menschen als Augentier ist der Farbeindruck bei außerordentlich vielen Produkten ganz zweifelsfrei ein wesentliches Bewertungskriterium und trägt ganz erheblich zum Erfolg oder auch Misserfolg des Produktes bei. Der Begriff „Farbeindruck“ unterscheidet sich hierbei erheblich vom reinen Begriff „Farbe“, worauf in Kapitel 2 noch sehr differenziert eingegangen wird.

Bei Kaufentscheidungen sorgen ansprechende Farben für ein deutlich gesteigertes Interesse an den farblich ansprechend gestalteten Produkten. In der Nutzungsphase trägt eine gleichbleibende Farbe nennenswert zu einem positiven Image bei und beeinflusst damit die Wertschätzung gegenüber dem Produkt enorm. Farbliche Veränderungen im Verlauf des Produktlebens führen dagegen zu geringer Wertschätzung oder gar Ablehnung.

Für das Erscheinungsbild von Kunststoffherzeugnissen und der Veränderung im Laufe des Produktlebens ist das Einfärben der Kunststoffe von zentraler Bedeutung. Daher ist es verwunderlich, dass in wissenschaftlichen Arbeiten und auch in Veröffentlichungen bislang stets nur einzelne Aspekte der insgesamt sehr umfangreichen Thematik behandelt wurden. Zudem sind viele Zusammenhänge des Einfärbens von Kunststoffen leider nach wie vor nicht ausreichend verstanden.

Dies ist nicht verwunderlich, denn die Herstellung eines zu vertretbaren Kosten hochwertig eingefärbten und ausreichend lange einsetzbaren Produkts ist sehr komplex.

Schritt für Schritt dieses Wissen zu erschließen, war und ist deshalb Ziel vieler Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten von Instituten aus dem Bereich der Farbe und Kunststoffen. Das Kunststoff-Zentrum SKZ in Würzburg nimmt hierbei eine herausragende Rolle ein. Neben der Spezialisierung auf Kunststoffe stehen hier zugleich das Einfärben sowie die Farb- und Oberflächenbeurteilung im Fokus zahlreicher Arbeiten. Das Ziel des Buches „Einfärben von Kunststoffen“ liegt darin, die diesbezüglich wichtigsten Sachverhalte in leicht verständlicher Form zusammenzustellen. Dabei soll an dieser Stelle bereits betont werden, dass der Schwerpunkt auf thermoplastischen Polymeren liegt. Allerdings sind zahlreiche Aspekte auch auf Duromere und Elastomere übertragbar.

In diesem einleitenden Kapitel wird zunächst die Bedeutung von Kunststoffen und den verwendeten Additiven (vgl. Abschnitt 1.2) sowie der Farbe für die Kunststoffherzeugnisse (vgl. Abschnitt 1.3) mit den diesbezüglich relevanten Entwicklungstrends (vgl. Abschnitt 1.4) behandelt.

Im Anschluss an diese Einführung folgen die wichtigsten physiologischen, psychologischen und physikalischen Grundlagen zur Wahrnehmung von Farbe (vgl. Kapitel 2). Darauf aufbauend werden für das Verständnis benötigte Zusammenhänge zum Prüfen und Bewerten des Erscheinungsbildes von Erzeugnissen mit Fokus auf die Farbe thematisiert (vgl. Kapitel 3). In Kapitel 4 folgen Erläuterungen zu den wichtigsten Anforderungen an die Farbmittel und deren Eigenschaften, angefangen von Farbstoffen bis hin zu den verschiedenen Pigmenten.

Die Grundlagen zur Alterung von Kunststoffen werden in Kapitel 5 behandelt, da diese Thematik für den Dauergebrauch eingefärbter Kunststoffbauteile von herausragender Bedeutung ist. Die prinzipielle Vorgehensweise zur Festlegung eines Farbrezeptes inklusive der diesbezüglich relevanten Grundlagen folgt in Kapitel 6. Im darauffolgenden Kapitel sind die wichtigsten Zusammenhänge zum distributiven und dispersiven Mischen zusammengestellt.

Die prinzipiellen Möglichkeiten zum Einfärben, die Auswirkungen eines bestimmten Farbmittleinsatzes und materialbedingte sowie verfahrens- und prozessspezifische Einflüsse auf den Farbton werden in Kapitel 8 erklärt. Außerdem werden mögliche Verarbeitungsfehler thematisiert. Danach wird in Kapitel 9 die industriell eingesetzte Anlagentechnik beim Einfärben von Polymeren beleuchtet. Dabei werden verschiedene Compoundiermaschinen und deren Prozessverhalten diskutiert.

Kapitel 10 beschäftigt sich mit Ersatzgrößen (alternativen Messgrößen) zur Bewertung von eingefärbten Kunststoffherzeugnissen sowie prozessnaher Prüfmethode u. a. beim Spritzgießen, Compoundieren und Extrudieren. Es werden also neben

den in der Einfärbepaxis etablierten Wegen auch neuere Ansätze zur beschleunigten Optimierung und Kontrolle der Einfärbeprozesse und zur Qualitätssicherung angesprochen.

Es werden folglich die wichtigsten Themen zum Einfärben von Kunststoffen behandelt (vgl. Bild 1.1). Dabei werden neben den erforderlichen Grundlagen auch viele Anwendungsbeispiele und Lösungskonzepte vorgestellt. Das Buch soll somit eine Hilfe für alle sein, die sich mit Fragestellungen aus dem Bereich des Einfärbens von thermoplastischen Polymeren oder Kunststoffbauteilen, insbesondere der Rezeptur, der Auswahl und Optimierung der Maschinen- und Verfahrenstechnik sowie der Prüftechnik bzw. Qualitätssicherung, beschäftigen.

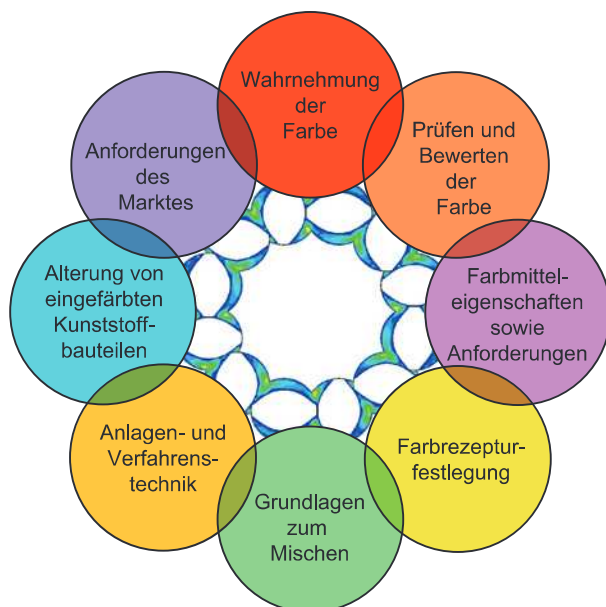


Bild 1.1 Bedeutsame Aspekte beim Einfärben von Kunststoffen

■ 1.2 Bedeutung von Kunststoffen und Additiven

Der weltweite Kunststoffverbrauch steigerte sich seit 1950 bis 2015 jährlich um ca. 8,6% auf 322 Millionen Tonnen pro Jahr. Zwischen 2002 und 2015 lag das Wachstum noch bei etwa 3,5% und soll auch die nächsten Jahre ähnlich wachsen [4] [5]. Die Märkte Asiens liegen dabei an der Spitze. Alleine die führende Nation China

■ 2.1 Einführung

Betrachtet man die Historie bezüglich naturwissenschaftlicher Erkenntnisse über Farben, so stammen die frühen Untersuchungen von *Newton* aus der Zeit um das Jahr 1671, die er im Jahre 1704 zusammengefasst hat [1], und von *Goethe*, die er im Jahre 1810 als Farbenlehre publiziert hat [2]. Wegweisend sind u. a. die Arbeiten von *Young* mit der Erfindung des Spektrografen zur Messung der Intensitätsverteilung von Lichtquellen und der ersten physikalisch und physiologisch begründeten Dreifarbenlehre zum Sehen von Farben [3], von *Graßmann* mit Farbgesetzen zur additiven Farbmischung aus dem Jahre 1853 [4], von *Helmholtz* die heute gültige Dreifarbenlehre [5] und von *Maxwell* aus der Zeit um 1860 [6] und *Schrödinger* aus der Zeit um 1920 [7]. *Schrödinger* formulierte die höhere Farbmessung, auf der die heutigen farbmessenden Methoden basieren. Die Wahrnehmung von Farbe ist heute weitgehend verstanden und die Hintergründe in der Literatur vielfältig beschrieben [8] [9] [10] [11] [12] [13].

In unserem täglichen Sprachgebrauch wird der Begriff Farbe für die verschiedensten Aspekte und Gegenstände verwendet. So sprechen wir z. B. von Farbe, wenn wir Malerfarbe für die Wand meinen. Dabei kennzeichnen Wortverbindungen wie Malfarbe, Druckfarbe oder Wasserfarbe den stofflichen Charakter dieser Dinge eigentlich bedeutend besser als nur das Wort Farbe. Auch für das farbige Erscheinungsbild von Objekten unter der Voraussetzung einer entsprechenden Beleuchtung verwenden wir den Begriff Farbe. Gemeint ist in diesem Fall die Körperfarbe des Objektes oder auch die Filterfarbe eines transparenten Objektes.

Nach DIN 5033 ist Farbe definiert als „*diejenige Gesichtsempfindung (Sinnesempfindung) eines dem Auge strukturlos erscheinenden Teiles des Gesichtsfeldes, durch die sich dieser Teil bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge von einem gleichzeitig gesehenen, ebenfalls strukturlosen angrenzenden Bezirk allein unterscheiden kann*“. Dementsprechend ist die Farbe ein Unterscheidungsmerkmal für sonst in Form, Größe und Helligkeit nicht unterscheidbare Gegenstände.

Da in der Farbmeterik auch Objekte unterschieden werden können, die bezüglich ihrer optischen Eigenschaften ausschließlich durch ihre Helligkeit verschieden sind, müssen auch Weiß, Grau und Schwarz zu den Farben gezählt werden. Goethe bezeichnete diese sogenannten unbunten Farben allerdings als Unfarben. Das Merkmal, das verschiedene Farben unterscheidet, ist der sogenannte Farbton (Bunton).

In der Farbmeterik (Lehre von den Maßbeziehungen zwischen Farben) versteht man – streng genommen – unter dem Begriff Farbe ausschließlich die optische Erscheinung, die von elektromagnetischer Strahlung ausgelöst wird, die unser Auge erreicht, und dort in eine Nervenerregung umgewandelt wird und über das Gehirn als Farbe in das Bewusstsein des Menschen tritt. Farbe ist also ein Sinneserlebnis – eine sogenannte Gesichtsempfindung. Das Ganze ist demzufolge ein sehr komplexer biologischer Vorgang, bei dem die Strahlung und deren Veränderung durch ein Objekt (z. B. Probe) nur die äußere physikalische Ursache ist. Die Strahlung oder auch eine Probe für sich betrachtet, sagt dementsprechend nichts Ausreichendes über die Farbe aus, denn dazu bedarf es der sinnesphysiologischen Verarbeitung. Die Sinnesempfindung ihrerseits setzt voraus, dass ein lebender bzw. der Empfindung fähiger Organismus vorhanden ist (vgl. Geschmackssinn oder Schmerzempfinden beispielsweise durch Nadelstiche).

Da Farbe dementsprechend ein durch das Auge und das Gehirn vermittelter Sinnesindruck ist, ist die Wahrnehmung von Farbe für alle sehenden Menschen eine absolut fundamentale Selbstverständlichkeit.

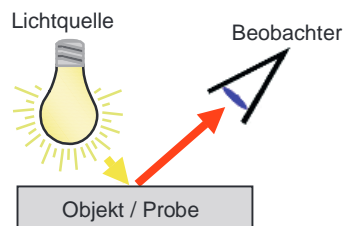


Bild 2.1 Beeinflussung der Wahrnehmung von Farbe

Der Sinnesindruck Farbe hängt, wie Bild 2.1 verdeutlicht, von folgenden drei Faktoren ab:

- Lichtquelle (Lichtart, Intensität)
- Probe (Rezeptur, makroskopische und mikroskopische Oberfläche)
- Beobachter (Sensitivität)

Der physikalische Vorgang beinhaltet folglich, dass die Strahlung (das Licht) $E(\lambda)$ mit einer bestimmten Wellenlänge λ durch die Wechselwirkung mit dem Objekt

bzw. der Materie verändert bzw. gefiltert wird ($F(\lambda)$) und beim Beobachter bzw. im Detektor, der eine wellenabhängige Sensitivität $V(\lambda)$ hat (auch spektrale Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich von λ_1 bis λ_2 genannt), einen ebenfalls wellenabhängigen Beobachter- bzw. Lichtreiz (Farbreiz) $R_B(\lambda)$ erzeugt:

$$R_B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) F(\lambda) E(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

Da der Mensch tagsüber bzw. in beleuchteter Umgebung mit dem Öffnen der Augen stets Farben sieht, wird im Allgemeinen kaum über Farben oder deren Eigenschaften und Wirkungen nachgedacht. Dies ist prinzipiell bemerkenswert, denn Farben sind von elementarer Bedeutung für das menschliche Empfinden und werden aufgrund ihrer Signalwirkung ganz gezielt als Steuerungsmöglichkeit eingesetzt.

Die Analyse der Evolution des Sehens ergibt, dass die meisten Säugetiere nur Schwarz-Weiß beziehungsweise Hell-Dunkel wahrnehmen können. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass dies auch beim menschlichen Auge am Evolutionsbeginn so war. In der weiteren Entwicklung kam die Gelb-Blau-Wahrnehmung hinzu und in der letzten Phase schließlich das Rot-Grün-Sehen. Diese Entwicklung war ein enormer Fortschritt für die Menschen, denn dadurch konnten beispielsweise reife Früchte von unreifen, beziehungsweise rote Früchte von grünen Blättern einfacher differenziert werden.

Die unterschiedlichen Farben vereinfachen es folglich, Objekte zu unterscheiden und sich leichter zurechtzufinden. Die Informationen, die von der Vielfalt der Farben in der Umgebung ausgehen, sind dementsprechend sehr vielschichtig. Sie können vom Menschen als Empfänger deshalb auch schneller und besser verarbeitet werden. Im Überlebenskampf bzw. Wettbewerb ergeben sich hierdurch eindeutige Vorteile.

Für den Menschen sind aber nicht nur die Farben der Objekte und der Umgebung wichtig, sondern auch die Farben unserer Mitmenschen, die damit Signale aussenden. Beispielsweise signalisiert uns ein plötzliches „im Gesicht rot werden“, dass eine innerliche Anspannung bei der betroffenen Person auftritt. Blasser Gesichter vermitteln einen unbefriedigenden Gesundheitszustand. Wenn man die physiologischen und medizinischen Aspekte beachtet, zeugen sie gar von Krankheit und Tod. Allerdings hat sich bei uns Nordeuropäern vom soziologischen Standpunkt die Einstellung zu blasser Haut geändert: Deutete die braune Haut in früheren Zeiten auf Arbeit in der Landwirtschaft hin und blasser Haut – auch als vornehme Blässe bezeichnet – eher auf Müßiggang, so hat sich die Einstellung heute gewandelt. Heute sind die „Vielarbeiter“ blass; braun gebrannte Mitmenschen lassen Müßiggang oder Urlaub vermuten. An diesem Beispiel lassen sich aber auch

Tabelle 4.2 Farbtiefebewertung nach Standardfarbtiefe

Pigmenttyp	ST 1/3 (g/kg)	Chroma
Pigment A	2,0	75,0
Pigment B	2,5	75,0

Während zum Erreichen der Standardfarbtiefe *ST 1/3* in diesem Beispiel 2,5 g Pigment B pro kg Polymer benötigt werden, kommt man bei Verwendung von Pigment A mit 2,0 g Pigment pro kg Polymer aus. D. h. Pigment A ist 20 % farbstärker als Pigment B.

Vergleichsweise hohe Farbtiefen werden beispielsweise für Folien und Kunstleder aus PVC, Beschichtungen aus PUR, Spritzgussteile aus PP, PC oder ABS und Spinnfasern aus PA oder linearem Polyester gefordert. Für Rohre und Kabelmassen aus PE oder auch PVC, Armaturenabdeckungen und Stützlehnen aus PUR-Schaum sowie Formteile aus ungesättigten Polyesterharzen bestehen im Allgemeinen lediglich mittlere Anforderungen an die Farbtiefe.

■ 4.2 Anforderungen an Farbmittel bzw. Farbpräparationen

Neben den preislichen Aspekten sind die Anforderungen an Farbmittel sehr vielschichtig und betreffen gleichermaßen technologische Aspekte als auch Gesetzesvorgaben. An erster Stelle steht dabei allerdings zweifelsfrei die Frage, ob der vom Designer bzw. Produktverantwortlichen festgelegte und gewünschte Farbton mit einer entsprechenden Farbpräparation erreicht werden kann und in der Anwendung erhalten bleibt. Wichtige Qualitätsmerkmale für Farbmittel sind in Bild 4.5 verdeutlicht. Hierbei muss beachtet werden, dass bei partieller Löslichkeit Schwierigkeiten bezüglich Migration und auch Thermostabilität in Kauf genommen werden.

Farbmittel müssen folglich neben einem möglichst niedrigen Preis und einer hohen Farbstärke (bzw. erreichbaren Farbtiefe) relativ viele verschiedene technologische und gesetzliche Anforderungen erfüllen. Der aufgrund der zahlreichen Anforderungen aufwändige Ablauf um eine Farbeinstellung zu entwickeln, ist in Bild 4.6 gezeigt.

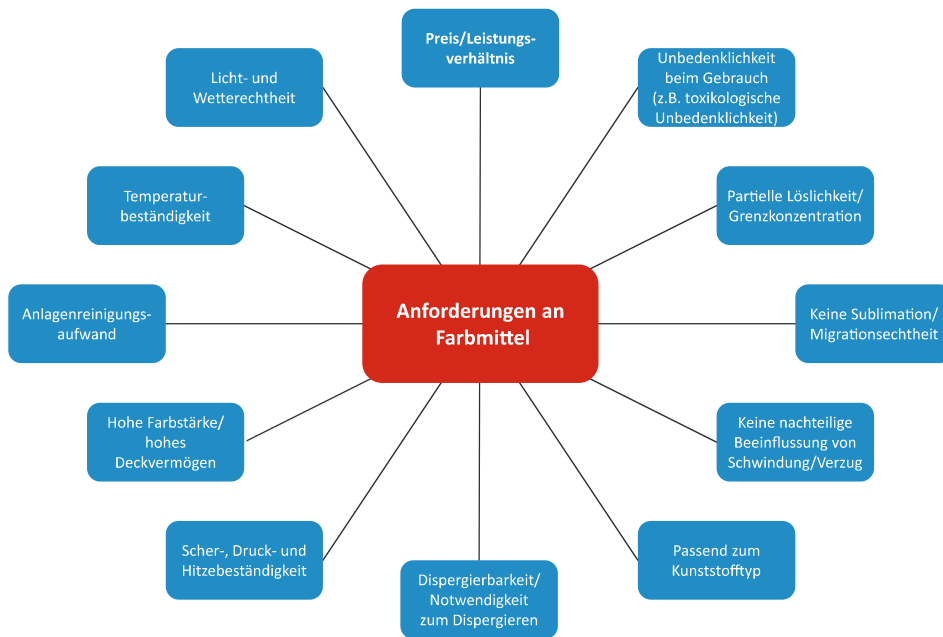


Bild 4.5 Anforderungen an Farbmittel

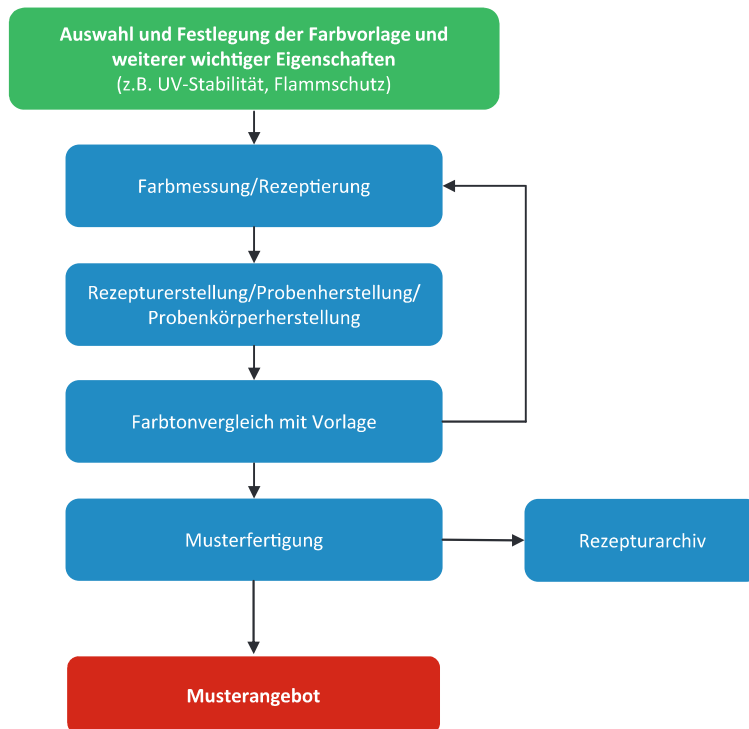


Bild 4.6 Prinzipielles Ablaufschema für die Entwicklung einer Farbeinstellung [8]

4.6.2 Anorganische Pigmente

Typische Vertreter anorganischer Pigmente sind z.B. Titandioxid und diverse Ruße, z.B. Furnaceruß-Typen (zu ca. 98 % eingesetzt), Gasruß-Typen (feinste Teilchen mit ca. 10 bis 80 nm), Flammruß-Typen (60 bis 200 nm) und Thermal- und Acetylenruß-Typen. Durch das hohe Streuvermögen und der damit bedingten ausgezeichneten Deckkraft nimmt das Weißpigment Titandioxid (TiO_2) von den Verbrauchsmengen eine herausragende Stellung ein.

Charakteristische Eigenschaften anorganischer Pigmente sind u. a. (vgl. Bild 4.30):

- Sehr hohe Temperaturstabilität
- Höchste Licht- und Wetterechtheit
- Keine Migration
- Geringe Neigung zu Verzug
- Relativ gute Deckung wegen der stark lichtstreuenden Wirkung
- Nicht sehr farbstark
- Relativ trübe bzw. unsauber im Farbton (Ausnahmen sind Cadmium, Blei und Bismutvanadate; diese sind sehr brillant)
- Hohes spezifisches Gewicht
- Möglichkeit für hohe Füllgrade

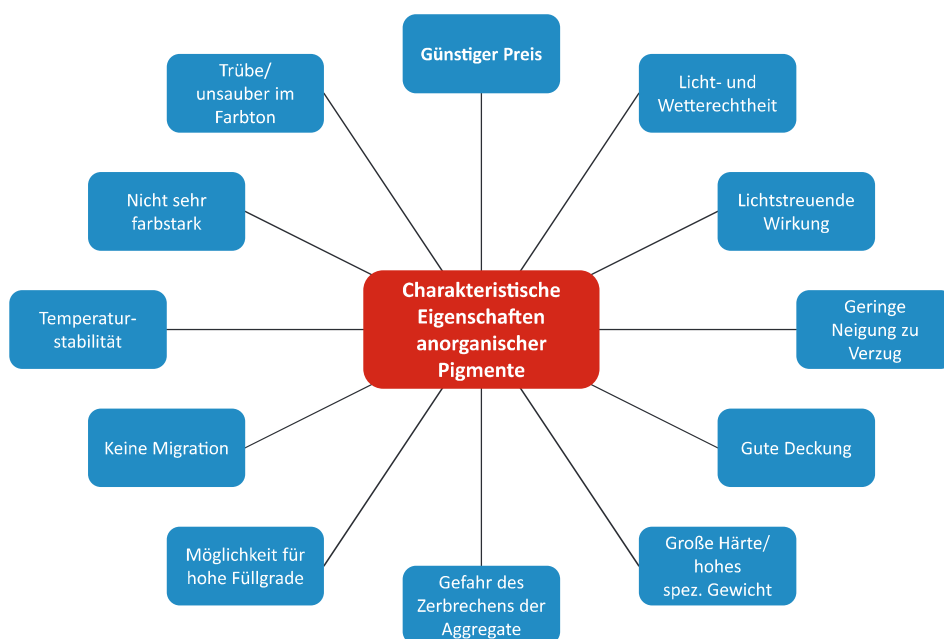


Bild 4.30 Charakteristische Eigenschaften anorganischer Pigmente

- Meist große Härte (Mohssche Härte) und dadurch Gefahr des Zerbrechens der zu dispergierenden Aggregate, wodurch sowohl Farbton als auch Deckkraft verändert werden.
- Günstiger Preis hinsichtlich Preis/Menge und bzw. Preis/Wirkung.

In Tabelle 4.10 sind die charakteristischen Eigenschaften einiger wichtiger anorganischer Pigmente zusammengefasst.

Tabelle 4.10 Charakteristische Eigenschaften ausgewählter anorganischer Pigmente

Pigment	Charakteristische Eigenschaften	Typische Vertreter
Oxide	<ul style="list-style-type: none"> ■ anorganische Pigmente ■ niedriges Preisniveau ■ sehr gute Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Titandioxid (haben von der Verarbeitungsmenge eine herausragende Bedeutung, Teilchengröße ca. 0,2 μm) ■ Eisenoxide ■ Chrom- und Nickeltitanate ■ Kobaltblau ■ Bismutvanadate
Sulfide	<ul style="list-style-type: none"> ■ anorganische Pigmente ■ im Allgemeinen weniger beständig als Oxide (z. B. eingeschränkte Wetterbeständigkeit von Zink- sowie Cadmiumsulfiden, Ultramarin unbeständig bei saurem Regen) ■ sehr gute Licht, Wetter- und Temperaturbeständigkeit weisen die sogenannten Cersulfid-Pigmente auf (rot oder orange) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Zinksulfide ■ Cadmiumpigmente ■ Ultramarinblau (eigentlich kein Sulfid, enthält ein S_3-Chromophor) ■ Cersulfid-Pigmente
Chromate	<ul style="list-style-type: none"> ■ anorganische Pigmente ■ mittleres Preisniveau ■ große Teilchengröße (dadurch hohe Deckkraft) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Chromgelb (Bleichromat) ■ Molybdatrot (Bleichromat)
Kohlenstoff-Pigmente	<ul style="list-style-type: none"> ■ werden häufig zu den anorganischen Pigmenten gezählt, obwohl aus Kohlenstoff aufgebaut ■ technische Ruße bilden zum Schwarzeinfärben oder Nuancieren eine außerordentlich bedeutsame Pigmentklasse ■ hohes Absorptionsvermögen, dadurch auch ausgezeichnete UV-Stabilisator 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Furnaceruß-Typen (zu ca. 98 % eingesetzt) ■ Gasruß-Typen (feinste Teilchen mit ca. 10 bis 80 nm) ■ Flammruß-Typen (60 bis 200 nm) ■ Thermal- und Acetylenruß-Typen

Bei den anorganischen Pigmenten gibt es Molekül-, Ionen- und Atomkristalle. Die Farbe resultiert bei den Kristallen aus der chemischen Zusammensetzung und dem geometrischen Aufbau des Kristallgitters. Als Beispiel für den Aufbau von anorganischen Pigmentkristallen ist in Bild 4.31 die Elementarzelle und ein Cluster des TiO_2 (Rutil) gezeigt.

Um Aussagen zur Alterung von eingefärbten Kunststoffen vergleichbar und gleichzeitig auch relativ kurzfristig verfügbar zu machen, werden in der Regel zeitraffende Bestrahlungen bzw. Bewitterungen in Geräten durchgeführt. Die genauen Bedingungen für die künstliche Bestrahlung bzw. Bewitterung von Kunststoffen sind in der DIN EN ISO 48922 festgelegt. Dabei wird die Beanspruchung der Werkstoffe durch die verschiedenen Klimafaktoren als „Bewitterung“ und teilweise auch als „Belichtung“ bezeichnet. Sie stellt als „äußere Alterung“ bei Beständigkeitsprüfungen den bedeutendsten Teilausschnitt der möglichen Alterungsvorgänge dar.

Für die Planung von Prüfabläufen in den Prüfgeräten (und damit für die Simulation der Wetterfaktoren) und auch für die Extrapolation sowie Interpretation der Ergebnisse aus den Tests sind zunächst einmal grundsätzliche Kenntnisse über die Strahlungs- bzw. Klimabedingungen und über ihre Wirkung auf die exponierten Werkstoffe erforderlich. Für die Materialprüfung ist vor allem die Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche von Bedeutung, die heute gut dokumentiert ist (vgl. Bild 5.13).

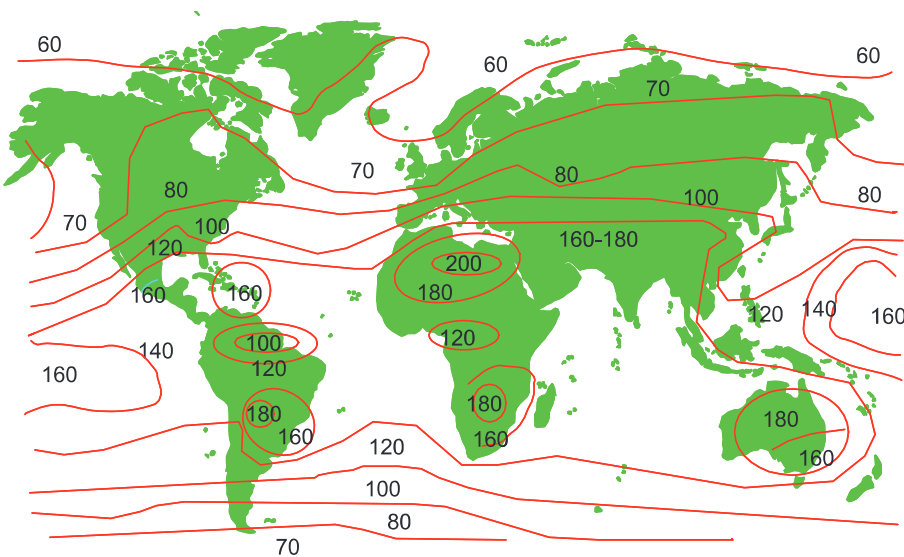


Bild 5.13 Globalstrahlung in kilo Langley (k Ly) pro m^2 und Jahr [9]

Die Energieeinstrahlung in Mitteleuropa liegt bei ungefähr $80 \text{ kLy}/(m^2a) = 3,352 \text{ MJ}/(m^2a)$. $1 \text{ Langley} = 1,0 \text{ cal}/cm^2 = 10,0 \text{ kcal}/m^2 = 41,9 \text{ kJ}/m^2$. Bild 5.13 zeigt sehr deutlich, dass die spektrale Bestrahlungsstärke der Sonnenstrahlung auf der Erdoberfläche sehr stark abhängig vom Ort ist. Hinzu kommt eine Abhängigkeit von der Jahres- und Tageszeit. Auf Basis meteorologischer Daten werden deshalb standardisierte spektrale Verteilungen der Sonnenenergie festgelegt. Zu nennen ist hier z. B. die CIE Publikation Nr. 85, Tabelle 4 [9].

Die CIE-Publication No. 85 stellt also Daten für das Spektrum der Sonnenstrahlung unter atmosphärischen Bedingungen zur Verfügung. Eine verkürzte Version in Form einer Tabelle, welche die maximale globale Strahlung am Äquator beschreibt, ist in DIN EN ISO 48921 enthalten. Referenzwerte für die spektrale, solare Bestrahlungsstärke am Boden sind in ISO 9845 enthalten. Die DIN EN 61725 gibt eine analytische Darstellung für solare Tagesstrahlungsprofile wieder.

Die Strahlungsenergie ist sehr viel charakteristischer für den Bewitterungszustand von Prüfkörpern als die bloße Auslegungszeit, da die Globalstrahlung – außer dem Tag/Nacht-Zyklus – auch starken jahreszeitlichen, meteorologischen und jährlichen Schwankungen in der Intensität wie auch solchen in der spektralen Zusammensetzung unterliegt [1].

Die Strahlungsleistung:

$$\Phi = Q / t \quad (5.5)$$

gibt an, welche Strahlungsenergie Q pro Zeiteinheit von der Strahlungsquelle abgegeben wird. Die zeitlich variierende Bestrahlungsstärke:

$$E = \Phi / F \quad (5.6)$$

gibt an, welche Strahlungsleistung auf eine Fläche F auftrifft.

Bei beiden genannten Größen ist es notwendig, den Wellenlängenbereich anzugeben, in dem die Werte gemessen oder für den die Werte berechnet wurden. Geht man zu kleinen Wellenlängenintervallen über, so erhält man die spektrale Bestrahlungsstärke (Spektralverteilung):

$$E_{\lambda} = \Phi_{\lambda} / F \quad (5.7)$$

Sie gibt an, wie groß die Bestrahlungsstärke auf einer Fläche im Wellenlängenbereich $\Delta\lambda$ (üblicherweise $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$) ist. Die Gesamtheit aller E_{λ} ist die Strahlungsfunktion, oft auch spektrale Energieverteilung der Strahlung genannt. Die Bestrahlungsstärke im Wellenlängenbereich zwischen λ_1 und λ_2 ist dann:

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda} \, d\lambda \quad (5.8)$$

mit der Bestrahlungsstärke E , den beiden Grenzwellenlängen λ_1 und λ_2 sowie der spektralen Bestrahlungsstärke E_{λ} .

Bild 5.19 und Tabelle 5.1 zeigen den Einfluss verschiedener Farbpigmente auf die Witterungsstabilität beispielhaft für ein mit verschiedenen Blaupigmenten eingefärbtes PE-HD.

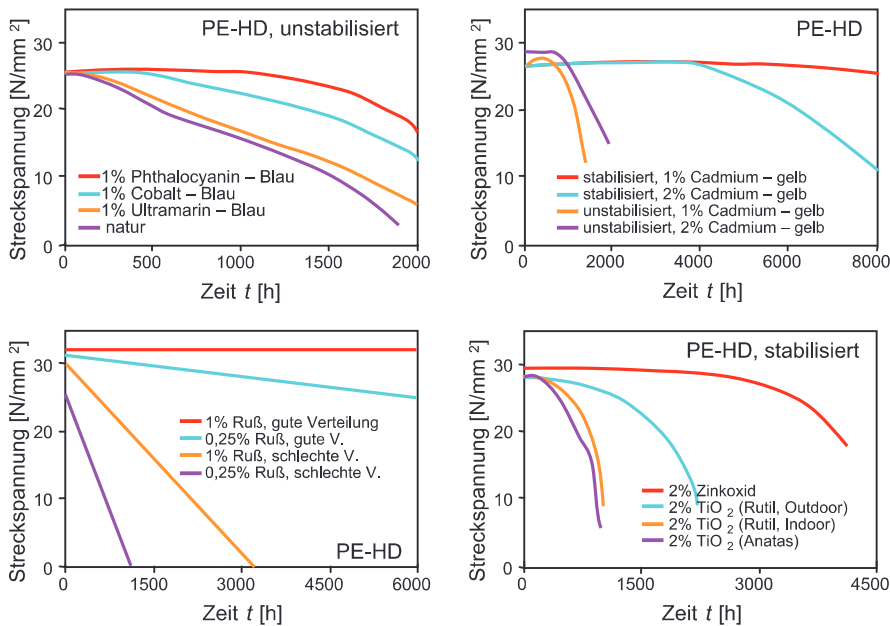


Bild 5.19 Einfluss von Pigmenten auf die Witterungsbeständigkeit von PE-HD untersucht im Weatherometer [1]
 Oben links: Einfluss verschiedener Blaupigmente
 Oben rechts: Einfluss der Konzentration von Pigment und Stabilisator
 Unten links: Einfluss der Verteilung
 Unten rechts: Einfluss verschiedener Weißpigmente und deren Struktur

Tabelle 5.1 Verbesserung der Witterungsbeständigkeit von PE-HD durch Farbpigmente im Vergleich zu nicht eingefärbter Naturware [1]

Farbe	Pigmentart	Verbesserung
Weiß	stabilisierte Titandioxide	30%
Gelb	Cadmiumsulfid	30 bis 40%
Orange	Cadmiumsulfid/selenid	30 bis 40%
Rot	Cadmiumsulfid/selenid	30 bis 40%
Eurorot	Cadmiumsulfid/selenid	40 bis 50%

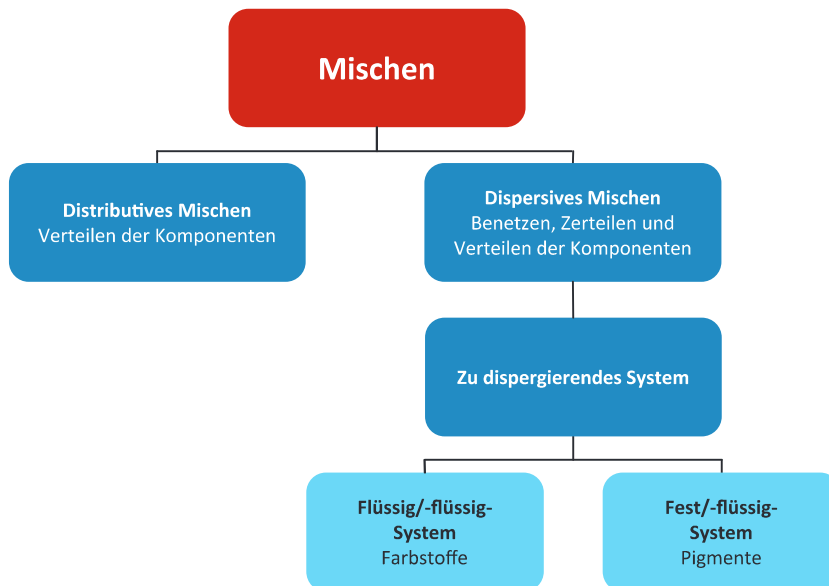


Bild 7.3 Klassifizierung beim Mischen

■ 7.1 Strömungsverhältnisse beim Mischen

Für das Mischen sind, wie bereits erwähnt, die Strömungsverhältnisse in einem vorgesehenen Mischer von fundamentaler Bedeutung. Grundlage aller mathematisch-physikalischen Beschreibungen des Prozessverhaltens und damit auch der Strömungsvorgänge in einem Extruder sind die Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie.

Zur exakten Beschreibung müssen an jedem durchströmten Ort zu jeder Zeit das Geschwindigkeitsfeld und die thermodynamischen Zustandsgrößen Druck, Dichte und Temperatur bekannt sein. Zur Beschreibung des Materialverhaltens sind die Erhaltungsgleichungen mit einem entsprechenden Stoffgesetz (Konstitutivgleichung) zu verknüpfen. Für die Lösung des Gesamtsystems aus Erhaltungs- und Konstitutivgleichungen sind in den sehr komplexen Geometrien der Mischer stets vereinfachende Annahmen zu treffen und Randbedingungen festzulegen. Die Qualität der Vereinfachungen und der Randbedingungen bestimmt folglich die Genauigkeit der Lösung.

Für ein ruhendes geschlossenes System gilt der 1. Hauptsatz der Thermodynamik. Dieser beschreibt in einem System eine Zustandsänderung von Zustand 1 zu Zustand 2 und besagt, dass die Summe aus zugeführter Wärme Q_{12} und Arbeit W_{12} eine Änderung der inneren Energie ΔU_{12} bewirkt:

$$Q_{12} + W_{12} = U_2 - U_1 \quad (7.4)$$

Bezieht man die Größen relativ auf die Masse m ($q = Q/m$, $w = W/m$, $u = U/m$), so ergibt sich:

$$q_{12} + w_{12} = u_2 - u_1 \quad (7.5)$$

Die dem System beim Übergang von Zustand 1 zu Zustand 2 zugeführte Arbeit ergibt sich durch die am System angreifende Kraft F und den Weg s , also durch die Summe von äußerer Arbeit W_{ext} , der Volumenänderungsarbeit W_V und der mechanischen Reibungsarbeit W_{Diss} (Dissipationsarbeit):

$$W_{12} = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s} = W_{\text{ext}} + W_V + W_{\text{Diss}} \quad (7.6)$$

Dabei gilt mit der Friktionskraft \vec{F}_{fri} , Geschwindigkeit v , Erdbeschleunigung g , Potenzialhöhe z , dem Druck p und Volumen V :

$$W_{\text{ext}} = \left[\frac{m}{2} v^2 + m g z \right]_2 - \left[\frac{m}{2} v^2 + m g z \right]_1 \quad (7.7)$$

$$W_V = - \int_{v_1}^{v_2} p \, dV \quad (7.8)$$

$$W_{\text{Diss}} = \int_1^2 \vec{F}_{\text{fri}} \cdot d\vec{s} \quad (7.9)$$

Dabei ist die zugeführte Arbeit definitionsgemäß größer null und die abgeführte Arbeit kleiner null.

Im System führt eine Temperaturänderung ΔT und/oder eine Druckänderung Δp zu einer Änderung der Enthalpie ΔH unter Annahme identischer spezifischer Wärmekapazitäten $c = c_v = c_p$ und einer konstanten Dichte ρ :

$$\Delta H = c \Delta T + \Delta p / \rho \quad (7.10)$$

Der erste beschreibende Erhaltungssatz ist der sogenannte Kontinuitätssatz:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (7.11)$$

Dabei ist ρ die Dichte der Kunststoffschmelze, t die Zeit und \vec{v} der Geschwindigkeitsvektor in die Richtung der jeweiligen Koordinate. In ausführlicher Form lautet die Gleichung für kartesische Koordinaten (x, y, z):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) \right] \quad (7.12)$$

Der Kontinuitätssatz ist also die mathematische Formulierung einer Massenbilanz in einem ortsfesten Kontrollraum. Er besagt, dass die in einem Volumen gespeicherte Masse der Differenz der ein- und austretenden Masseströme entspricht.

Die nachfolgende Bewegungsgleichung (Impulssatz) ist der zweite Erhaltungssatz:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) = -\nabla (\rho \vec{v} \vec{v}) - \nabla p - \nabla \tau + \rho \vec{g} \quad (7.13)$$

Darin ist τ der Schubspannungstensor, p der Druck und \vec{g} die Fallbeschleunigung. In ausführlicher Form lautet die Gleichung für kartesische Koordinaten (x, y, z) wie folgt:

x -Richtung:

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \quad (7.14a)$$

y -Richtung:

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y \quad (7.14b)$$

z -Richtung:

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (7.14c)$$

Die Bewegungsgleichung drückt aus, dass die Änderung eines Impulses pro Zeit in einem Volumenelement der Differenz von ein- und austretendem Impuls plus der am System wirkenden Kräfte (z. B. aufgrund der Erdbeschleunigung) entspricht.

Der Energiesatz bilanziert die im Kontrollraum gespeicherte Wärmemenge zu den zu- und abfließenden Wärmeströmen und den im Kontrollraum existierenden Wär-