

Gerhard Pfaff

Der Lebenszyklus von Technologien am Beispiel der Entwicklung und Produktion von Effektpigmenten

1 Produkt- und Technologielebenszyklus

Der Produktlebenszyklus ist ein Marktreaktionsmodell, das die Absatz- und Umsatzentwicklung eines neu eingeführten Produktes über einen bestimmten Zeitraum beschreibt. Einführungen von neuen Produkten am Markt beginnen in der Regel mit der Phase der Produktentwicklung, an deren Ende meist ein Prototyp des Zielproduktes steht. Für die Phase der Produktentwicklung, aber auch der Markteinführung hat sich ein konsequentes Projektmanagement bewährt. Beide Phasen stehen am Beginn des Lebenszyklus eines Produktes.

Der Produktlebenszyklus kann durch die Phasen

- Produktentwicklung (Projektmanagement),
- Markteinführung (Projektmanagement),
- Wachstum,
- Reife,
- Sättigung und
- Rückgang des Umsatzes (letzter Teil des Produktlebenszyklus)

beschrieben werden. Abbildung 1 zeigt schematisch die einzelnen Phasen des Lebenszyklus eines Produktes.

Es wird deutlich, dass nach den Phasen der Produktentwicklung, der Markteinführung, des Wachstums und der Reife die Phase der Sättigung einsetzt. In dieser Phase kommt es oft zu einem Produkt-Relaunch, um ein Produkt noch über einen längeren Zeitraum profitabel zu vermarkten. Bereits in der Phase der Sättigung setzt häufig auch schon die Entwicklung eines Nachfolgeproduktes ein. In der letzten Phase des Produktlebenszyklus wird im besten Fall schon das Nachfolgeprodukt am Markt eingeführt. Schließlich wird das Produkt vom Markt genommen (Marktaustritt), während sich das Nachfolgeprodukt bereits in der Wachstumsphase befindet.

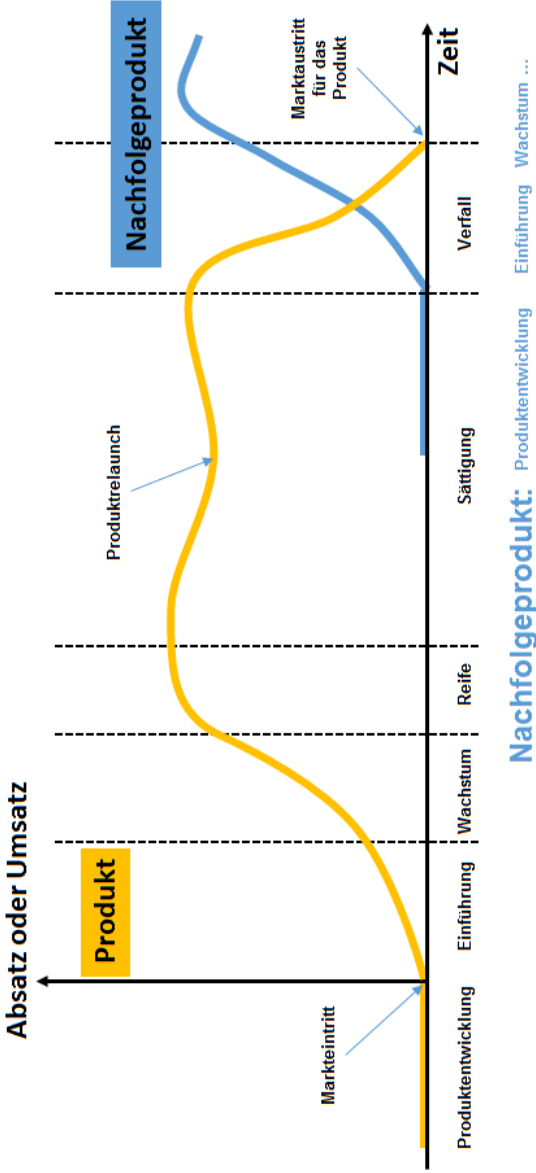


Abb. 1: Phasen des Produktlebenszyklus unter Einbeziehung der Ablösung eines Produktes durch ein Nachfolgeprodukt

Quelle: <https://www.business-wissen.de/kapitel/produktlebenszyklus-planen/>

Die Lebenszyklen von Produkten und Technologien stehen in engem Zusammenhang, beginnend von der Produktentwicklung bis zum Marktaustritt des Produktes. Drei Fälle sind zu unterscheiden:

1. Produktneuentwicklungen, bei denen vorhandene Technologien verwendet werden können;
2. Produktneuentwicklungen, bei denen vorhandene Technologien in modifizierter Form verwendet werden können;
3. Produktneuentwicklungen, bei denen eine neue Technologie entwickelt werden muss.

Die Verwendung einer Technologie in bereits genutzter oder modifizierter Form ist oft von Vorteil. Bei der Entwicklung, Einführung und Nutzung von Technologien sind unterschiedliche Faktoren zu berücksichtigen. Dazu zählen

- Anforderungen an die Qualität des Produktes sowie an die Herstellkosten;
- Bereitstellung von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen sowie deren Verbrauch, Energieverbrauch, CO₂-Fußabdruck, Transportaufwendungen;
- Umweltwirkungen (umweltrelevante Gewinnung von Ressourcen, Entsorgung und Weiterverwendung von Nebenprodukten, Emissionen, Fragen der Toxizität);
- Weiterverwendung der Technologie für andere Produkte, Recycling, umweltgerechte Entsorgung, Rückbau, Nachnutzung der Anlagen und des Standorts.

Bei der Entwicklung von neuen Effektpigmenten spielen alle hier genannten Faktoren eine wichtige Rolle. Das trifft auch für alle anderen Farbmittel (Pigmente und Farbstoffe) zu. In jedem Fall wird zunächst geprüft, ob vorhanden Technologien genutzt oder gegebenenfalls modifiziert werden können, bevor die Entwicklung einer neuen Technologie initiiert wird.

2 Pigmente: Grundlagen und technische Bedeutung

Pigmente sind aus Teilchen bestehende, im Anwendungsmedium praktisch unlösliche Substanzen, die als Farbmittel oder wegen ihrer korrosionshemmenden oder magnetischen Eigenschaften verwendet werden. Sie unterscheiden sich dadurch von den ebenfalls zu den Farbmitteln zählenden Farbstoffen, die in Anwendungsmedien löslich sind. Zu den Anwendungsmedien gehören vor allem Auto- und Industrielacke, Anstrichstoffe, Kunststoffe, Druckfarben, kosmetische Formulierungen und Baustoffe.

Eine besonders große technische Bedeutung besitzen anorganische Pigmente. Mehr als 96 % aller Pigmente sind anorganischer Natur. Tabelle 1 enthält eine Zusammenstellung zum Weltmarkt für Pigmente, die in dekorativen Anwendungen eingesetzt werden. Die produzierte Gesamtmenge liegt bei weit über 10 Mio. Tonnen. Mit mehr als 50 % der hergestellten Menge haben Titandioxid-Pigmente (Weißpigmente) die größte Bedeutung. Besondere technische Wichtigkeit haben auch Eisenoxid-Pigmente (Gelb-, Rot- und Schwarzpigmente), Zinkoxidpigmente (Weißpigmente) und Ruß-Pigmente (Schwarzpigmente). Organische Pigmente haben demgegenüber eine geringere Bedeutung, da sie häufig weniger stabil und in der Herstellung kostenintensiver sind. Viele andere Pigmente, darunter auch die Effektpigmente, erreichen Produktionsmengen, die unter 1 Mio. Tonnen liegen (vgl. Pfaff 2017).

Tab. 1: Weltmarkt für Pigmente (dekorative Anwendungen)
für das Jahr 2019

Pigment-Klasse	Produzierte Menge pro Jahr (t)	%
Titandioxid-Pigmente	6.300.000	54,9
Eisenoxid-Pigmente	1.600.000	13,9
Zinkoxid-Pigmente	1.400.000	12,2
Ruß-Pigmente	1.000.000	8,7
Zinksulfid-Pigmente	250.000	2,2
Organische Pigmente	350.000	3,1
Chromoxid-Pigmente	100.000	0,9
Bismutvanadat-Pigmente	90.000	0,8
Komplexe anorganische Buntpigmente	60.000	0,5
Bleichromat-Pigmente	40.000	0,4
Eisenblau-Pigmente	40.000	0,4
Ultramarin-Pigmente	60.000	0,5
Cadmium-haltige Pigmente	10.000	0,1
Metalleffektpigmente	85.000	0,7
Spezielle Effektpigmente (Perlglanzpigmente)	85.000	0,7
	11.470.000	100,0

Eigene Darstellung – geschätzt nach Angaben aus Fachzeitschriften wie Farbe + Lack, European Coatings Journal und aus Smithers-Rapra Reports

Pigmente haben häufig sehr lange Produkt- und Technologielebenszyklen. Industrielle anorganische Pigmente werden heute noch zum großen Teil nach Verfahren hergestellt, die bereits im 19. und frühen 20. Jh. entwickelt und eingeführt wurden. Die Technologien wurden und werden dabei zwar im Laufe der Zeit modifiziert und modernisiert, beruhen aber grundsätzlich auf den bei der Einführung der Synthesen genutzten Prozessen. Als Beispiele können hier die heute genutzten großtechnischen Verfahren zur Herstellung von Titandioxid-Pigmenten und Eisenoxid-Pigmenten genannt werden:

Titandioxid: (TiO ₂ , Weißpigment)	Sulfatverfahren	1915
Titandioxid: (TiO ₂ , Weißpigment)	Chloridverfahren	1960
Eisen(III)-oxid: (α -Fe ₂ O ₃ , Rotpigment)	Röstverfahren	1880
Eisen(III)-oxidhydroxid: (α -FeOOH, Gelbpigment)	Penniman-Verfahren	1917
Eisen(III)-oxidhydroxid: (α -FeOOH, Gelbpigment)	Laux-Prozess	1925

Nur bei der Entwicklung neuer Effektpigmente gab es in den letzten 30 Jahren auch Technologieneuentwicklungen, die einen Durchbruch erreicht haben. Diese wurden erforderlich, da die angestrebten neuen Farb- und Glanzeffekte mit vorhandenen Technologien nicht mehr darstellbar waren (vgl. Pfaff 2019).

3 Produkt- und Technologielebenszyklen bei speziellen Effektpigmenten

Pigmente werden in unterschiedlicher Weise in Klassen eingeteilt. Eine häufig genutzte Klassifizierung ist die in Weißpigmente, Buntpigmente, Schwarzpigmente, lumineszierende Pigmente, funktionelle Pigmente und Effektpigmente (vgl. Pfaff 2017). Die vom menschlichen Auge wahrgenommene Erscheinung eines Pigmentes (Farbe, Glanz, irisierender Effekt, Farb-Flop) geht auf die Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung aus dem sichtbaren Spektralbereich mit den Pigmentteilchen zurück. Abbildung 2 stellt diese Wechselwirkung anhand von Pigmentteilchen, die in ein Anwendungsmedium eingebettet sind, vergleichend dar. Spezielle Effektpigmente (Perlglanzpigmente, Interferenzpigmente), Metalleffektpigmente, Buntpig-

mente (Absorptionspigmente) und Weißpigmente sind dabei mit ihrer jeweils spezifischen Wechselwirkung mit sichtbarem Licht gegenübergestellt. Spezielle Effektpigmente und Metalleffektpigmente unterscheiden sich in ihrer Teilchengröße und ihrer Teilchenform signifikant von Buntpigmenten und Weißpigmenten. Sie bestehen aus plättchenförmigen Partikeln, deren Durchmesser meist im Bereich von 5 bis 100 μm liegt. Die Dicke der Plättchen beträgt typischerweise 0,2 bis 0,6 μm . Buntpigmente, Weißpigmente, aber auch Schwarzpigmente besitzen dagegen eher gleichmäßig geformte Partikel im Durchmesserbereich von 0,05 bis 1,0 μm .

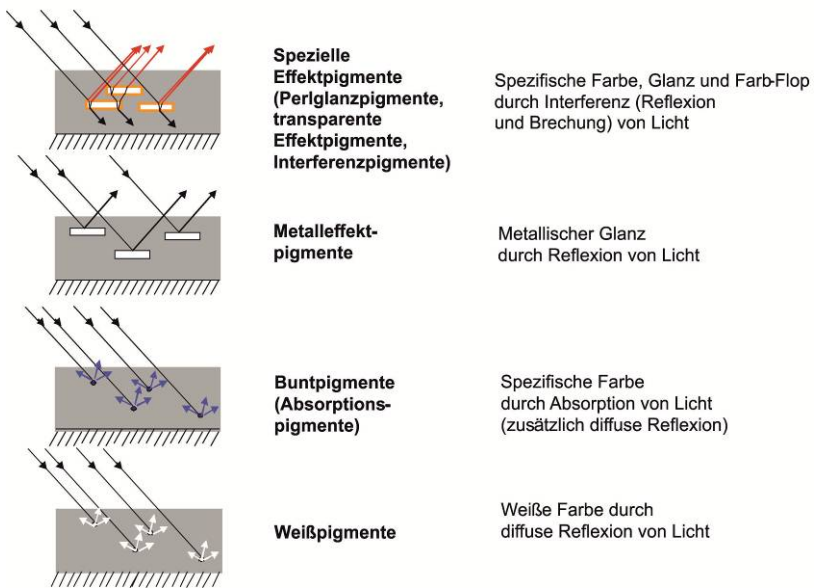


Abb. 2: Optische Wechselwirkung von sichtbarem Licht mit Teilchen verschiedener Pigmentklassen in einem Anwendungsmedium, z. B. in einem Lack

Quelle: Pfaff 2019

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf spezielle Effektpigmente, die in Bezug auf Produkt- und Technologielebenszyklen grundlegende Ähnlichkeiten zu anderen Pigmenten aufweisen, die sich aber in vieler Hinsicht auch von jenen unterscheiden. Die industrielle Herstellung von speziellen Effektpigmenten geht auf die Zeit um 1900 zurück. Über viele Jahr-

zehnte trugen die Pigmente die Bezeichnung „Perlglanzpigmente“, da sie in ihren Anwendungen den Glanz natürlicher und künstlicher Perlen nachahmen können. Die weitere Entwicklung dieser Pigmentklasse führte aber auch zu Produkten, die sich weniger durch Perlglanz als durch farbchangierende oder kristallähnliche Effekte auszeichnen. Daher wird heute vorwiegend die Bezeichnung „Spezielle Effektpigmente“ anstelle von „Perlglanzpigmente“ verwendet. Zur Unterscheidung von den lichtundurchlässigen Metalleffektpigmenten (vorwiegend Aluminium-, Kupfer- und Kupfer/Zink-Plättchen) wird teilweise auch die Bezeichnung „transparente Effektpigmente“ benutzt. Zusätzlich verwendet man auch die Bezeichnung „Interferenzpigmente“, da viele der optischen Effekte dieser Pigmente auf dem Phänomen der Interferenz beruhen.

Abbildung 3 zeigt die unterschiedlichen, bei speziellen Effektpigmenten vorkommenden Strukturprinzipien (vgl. Pfaff 2017). Grundsätzlich können die plättchenförmigen Pigmentteilchen aus einem optisch homogenen Material („Einschichter“, substratfreies Pigment) oder aus Schicht-Substrat-Strukturen („Mehrschichter“, Monoschicht-Pigment oder Multischicht-Pigment) bestehen. Substratfreie Pigmente bestehen aus einem optisch hochbrechenden Material, während Schicht-Substrat-Pigmente aus optisch hochbrechenden und niedrigbrechenden Materialien aufgebaut sind. Auf diesen Strukturen beruht die Wechselwirkung mit sichtbarem Licht, die für das menschliche Auge in Form von Glanz sowie von irisierenden und changierenden Farbeffekten zum Ausdruck kommt (vgl. Pfaff 2007).

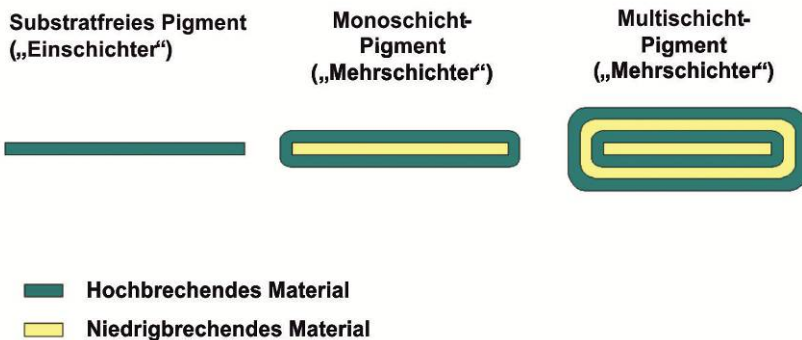


Abb. 3: Unterschiedliche Strukturprinzipien bei speziellen Effektpigmenten
Quelle: Pfaff 2017

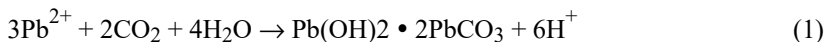
3.1 *Natürliches Fischesilber*

Natürliches Fischesilber, das eine Brechzahl von etwa 1,8 aufweist, ist das erste industriell erzeugte Perlglanzpigment. Es gehört wie basisches Bleicarbonat und Bismutoxidchlorid zu den klassischen Perlglanzpigmenten, die ihrer Struktur nach zu den substratfreien Pigmenten („Einschichter“) zählen. Bereits um 1900 wurde das Pigment hergestellt. Bei der Produktion isoliert man die natürlich vorkommenden Proteine Guanin und Hypoxanthin in Form dünner Plättchen aus den Schuppen von Weißfischen (Hering, Ukelei, Sardine). Für die Herstellung von 2 kg Pigment benötigt man etwa 100 Tonnen Fisch. Wichtige Prozessschritte sind das Entschuppen der Weißfische, das Herstellen einer wässrigen Schuppensuspension, das Auswaschen der Schuppensuspension mit organischen Lösungsmitteln, der Transfer der Schuppen von der wässrigen in die organische Phase, das Extrahieren der Pigmentkristalle mit organischen Lösemitteln und das Überführen der Pigmentpartikel in Nitrocellulose. Natürliches Fischesilber kommt nur in Form von Suspensionen mit meist 22 bis 25 % Feststoffgehalt unter dem Namen „Perlessenz“ oder „Essence d’Orient“ in den Handel (vgl. Pfaff 2007).

Natürliches Fischesilber wurde vor allem im Zeitraum von 1900 bis 1950 in der Kosmetik vermarktet. Die Technologie zur Herstellung des Pigmentes blieb über den Produktlebenszyklus unverändert. Entscheidend dafür, dass das sich natürliches Fischesilber nach 1950 am Markt kaum noch absetzen ließ, waren folgende Faktoren: aufwändige Technologie, damit verbunden hohe Herstellkosten und ein hoher Preis, Stabilitätsprobleme in verschiedenen Anwendungsmedien außerhalb der Kosmetik, Markteinführung von neuen Perlglanzpigmenten, die auf Basis verbesserter Technologien hergestellt werden konnten und attraktivere Effekte ermöglichten.

3.2 *Basisches Bleicarbonat*

Basisches Bleicarbonat ($\text{Pb}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{PbCO}_3$) mit einer Brechzahl von etwa 2,0 stellt man als Perlglanzpigment in Form dünner Plättchen durch Einleiten von Kohlendioxid in verdünnte Bleiacetatlösung und unter Einhalten geeigneter Reaktionsparameter her (vgl. Pfaff 2007):



Produktion und Vermarktung von Perlglanzpigmenten auf Basis von basischem Bleicarbonat erfolgten vorwiegend im Zeitraum von 1950 bis 2000. Einzelne Hersteller in Asien produzieren die Pigmente bis heute, während sich fast alle anderen Produzenten auf Grund des Bleigehaltes und der damit verbundenen Toxizität aus dem Geschäft mit basischem Bleicarbonat zu-

rückgezogen haben. Die Technologie zur Herstellung der Pigmente, die gut beherrschbar ist, blieb über den gesamten Produktlebenszyklus nahezu unverändert. Im Gegensatz zur Produktion von natürlichem Fischsilber gibt es bei der Synthese von basischem Bleicarbonat kein Herstellkostenproblem. Neben der mit dem Bleigehalt verbundenen Zulassungsproblematik für mehr und mehr Anwendungen spielte beim Marktaustritt der Pigmente vor allem eine Rolle, dass neue, nichttoxische Perlglanzpigmente in der zweiten Hälfte des 20. Jh.s als Nachfolgeprodukte auf den Markt drängten.

3.3 *Bismutoxidchlorid*

Bismutoxidchlorid (BiOCl) mit einer Brechzahl von 2,15 ist neben natürlichem Fischsilber und basischem Bleicarbonat das dritte klassische Perlglanzpigment. Bei Zugabe von Salzsäure zur wässrigen Lösung eines Bismutsalzes kristallisiert unter geeigneten Reaktionsbedingungen BiOCl in Form dünner Plättchen aus (vgl. Pfaff 2007):



Die Produktion und Vermarktung von BiOCl -Effektpigmenten begann etwa 1960 und dauert seither an. Die Technologie zur Herstellung der Pigmente, die gut beherrschbar ist, blieb über den bisherigen Lebenszyklus unverändert. Die Herstellkosten der Pigmente sind vergleichsweise hoch, stellen aber kein ernstes Problem dar. Ein Nachteil der BiOCl -Pigmente ist die geringe Fotostabilität, die für viele Anwendungen, vor allem im Außenbereich, nicht ausreicht.

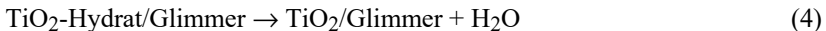
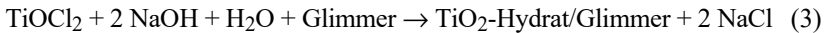
3.4 *Metalloxid-Glimmerpigmente*

Mit der Produktion und Markteinführung von Metalloxid-Glimmerpigmenten begann um 1970 die Zeit der Schicht-Substrat-Pigmente („Mehrschichtter“). Die ersten dieser neuartigen Effektpigmente bestanden aus Glimmerplättchen, die mit einer dünnen Schicht von Titandioxid umhüllt waren. Bis heute stellen Pigmente mit diesem Aufbau die wichtigste Gruppe der speziellen Effektpigmente dar. Die TiO_2 -Schichten besitzen Dicken im Bereich von 50 bis 250 nm. Die Dicke dieser Schichten bestimmt die Interferenzfarbe der Pigmente (vgl. Pfaff 2007). Der Glimmer als Substratmaterial ist niedrigbrechend (Brechzahl 1,5 bis 1,6), während das Titandioxid hochbrechend ist (die Brechzahlen für die beiden relevanten TiO_2 -Modifikationen betragen 2,5 für Anatas und 2,7 für Rutil). Anstelle von TiO_2 kommen auch andere hochbrechende Metalloxide wie $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, Fe_3O_4 , Cr_2O_3 als Schichtmaterialien in Betracht.

Bei der Synthese der Metalloxid-Glimmerpigmente wird zumeist natürlicher Glimmer (Muskovit) eingesetzt. Seit einigen Jahren kommt auch synthetischer Glimmer (Fluorophlogopit) zum Einsatz. Die folgenden Prozessschritte spielen bei der Synthese der Pigmente eine wichtige Rolle:

- Mahlen (mechanisches Spalten) des Glimmers in dünne Plättchen;
- Klassieren der Glimmerplättchen (Zerlegen in Kornfraktionen);
- Herstellen einer wässrigen Glimmersuspension;
- Beschichten der suspendierten Glimmerplättchen mit Titandioxidhydrat oder einem anderen Metalloxidhydrat durch Zugabe einer Metallsalzlösung und Natronlauge;
- Filtrieren, Waschen und Trocknen der beschichteten Glimmerplättchen;
- Kalzinieren der getrockneten Plättchen, dabei Umwandeln des Metalloxidhydrates in das Metalloxid sowie Fixieren des gebildeten Metalloxides auf der Glimmeroberfläche.

Am Beispiel der TiO_2 -Abscheidung auf Glimmer lassen sich die beiden wichtigsten Prozessschritte wie folgt formulieren:



Reaktion (4) findet bei Temperaturen im Bereich von 700 bis 1.000 °C statt. Am Ende des Prozesses liegt das Pigment in Form von mit TiO_2 beschichteten Glimmerplättchen vor.

Die Produkt- und Technologielebenszyklen dieser Pigmentgruppe reichen von der ersten Markteinführung und der damit verbundenen Produktion bis heute. Die Technologie zur Herstellung wurde in den letzten 50 Jahren immer wieder modifiziert und verbessert. Die technologischen Weiterentwicklungen betrafen vor allem die Glimmer-Technologie (Mahl- und Klassiertechnik), die Beschichtung (Sulfatverfahren, Chloridverfahren) sowie die Qualitätskontrolle (Farbmesstechnik, Analytik). Im Laufe der Jahrzehnte ist es gelungen, die Herstellkosten so zu senken, dass Pigmentpreise möglich wurden, die für die meisten der Kunden vertretbar sind. Die Technologie ist grundsätzlich gut beherrschbar. Eine Herstellkostensenkung ist aber weiterhin wichtig, da sich die Pigmente im Lebenszyklus am Übergang von Hochleistungspigmenten zu Commodities befinden und ein kontinuierlicher Preisdruck besteht.

Die Suche nach neuen Effekten, die mit Metalloxid-Glimmerpigmenten nicht mehr zugänglich sind, führte zu Produktneuentwicklungen auf Basis anderer Substratmaterialien. Die wichtigsten in den letzten 20 Jahren hinzu-

gekommenen Effektpigmente basieren auf Siliciumdioxid, Aluminiumoxid und Borosilikatglas. Diese drei Materialien eignen sich in Form dünner Plättchen (Flakes) in gleicher Weise wie Glimmer als Substrat für Pigmente. Farbchangierende (Siliciumdioxid), kristallähnliche (Aluminiumoxid) oder besonders farbreine (Borosilikatglas) Effekte sind damit für die verschiedenen Anwendungsmedien möglich. Für jedes der drei plättchenförmigen Substrate wurde eine eigene Technologie entwickelt. Im Falle der Siliciumdioxid-Flakes handelt es sich um eine Bandtechnologie, bei den Aluminiumoxid-Flakes um eine Kristallisation aus der Salzschnmelze und bei den Borosilikat-Flakes um eine Herstellung aus der Glasschnmelze (vgl. Pfaff 2007; Rüger et al. 2004; Teaney et al. 1999). Zusätzlich zu den transparenten Substraten Glimmer (natürlich und synthetisch), Siliciumdioxid, Aluminiumoxid und Borosilikatglas wurden ab 1990 auch Schicht-Substrat-Pigmente produziert und vermarktet, deren Substrat optisch intransparente Aluminiumplättchen sind. Sie stellen einen Pigmenttyp dar, der zwischen den speziellen Effektpigmenten und den Metalleffektpigmenten einzuordnen ist (vgl. Pfaff 2007, 2017). Für die 1. Generation dieser Pigmente befinden sich Produkt- und Technologielebenszyklus bereits in der Phase des Verfalls, während die 2. Generation schon entwickelt ist und seit wenigen Jahren vermarktet wird.

Abbildung 4 stellt die Technologien für Glimmer-, Siliciumdioxid-, Aluminiumoxid- und Borosilikat-basierte Effektpigmente gegenüber. Es wird deutlich, dass für jedes Substratmaterial eine eigenständige Technologie notwendig ist, während die Beschichtung mit Metalloxiden jeweils mit den gleichen, zunächst für die Glimmerpigmente entwickelten Prozessschritten erfolgt. Letzteres ist technologisch gesehen ein ausgesprochen großer Vorteil für Pigmenthersteller, die mehrere oder sogar alle bekannten Schicht-Substrat-Pigmente produzieren.

Bei der Herstellung moderner Effektpigmente liegt der Fokus nicht nur auf dem Erreichen der geforderten Qualität in Bezug auf Farb- und Anwendungseigenschaften. Das kostengünstige Produzieren hat ebenfalls einen hohen Stellenwert. Maßnahmen für die Senkung der Herstellkosten sind unter anderem die Produktion im größeren Maßstab, die Nutzung von gleichen Apparaturen und technologischen Schritten für mehrere Produkte sowie die Reduktion des Energieverbrauchs. Wichtig ist zudem die Bereitstellung umweltgerechter Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe. Eine zunehmende Bedeutung, auch für spezielle Effektpigmente, hat in den letzten Jahren die CO₂-Bilanz (CO₂-Fußabdruck, Carbon footprint, Treibhausgasbilanz) erlangt. Sie ist ein

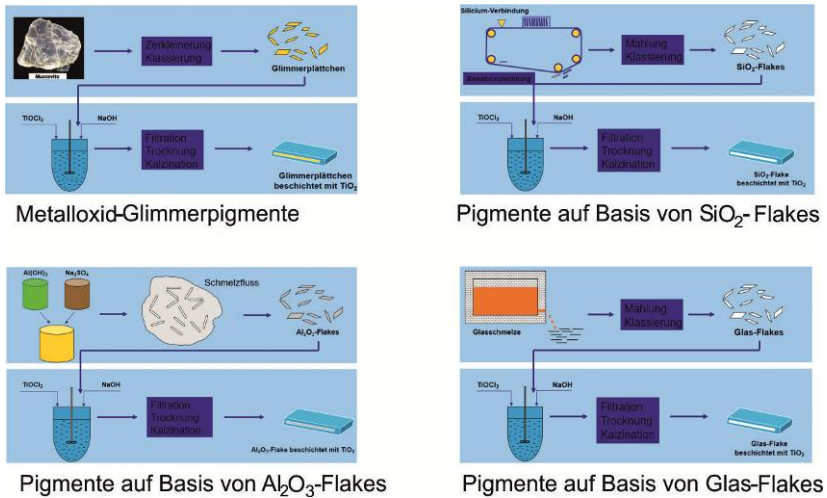


Abb. 4: Technologievergleich für unterschiedliche Schicht-Substratpigmente

Eigene Darstellung

Maß für alle Kohlendioxid-Emissionen (Gesamtbetrag), die direkt oder indirekt durch Aktivitäten oder Lebensstadien von Produkten oder Personen entstehen. Die Pigmenthersteller sind diesbezüglich sehr aktiv, um durch geeignete Maßnahmen in der Produktion die CO_2 -Bilanz nach unten zu bringen und damit zum Erreichen der globalen Klimaziele beizutragen. Große Anstrengungen werden auch unternommen, um anfallende Nebenprodukte wiederzuverwerten oder sachgerecht zu entsorgen, um Emissionen auf ein Minimum zu senken und um Fragen des Recyclings vom Beginn des Technologielebenszyklus an in die Betrachtungen einzubeziehen. Eine große Bedeutung haben Themen, die mit der Toxizität von Produkten (von den Rohstoffen bis zu den Endprodukten) sowie mit dem Arbeitsschutz (Regulierungen zum Einsatz und zum Umgang mit Chemikalien) in engem Zusammenhang stehen. Die Einstellung der Produktion von bleihaltigen Pigmenten (basisches Bleicarbonat), aber auch die generelle Nichtverwendung von toxischen Schwermetallen für spezielle Effektpigmente ist Ausdruck für umweltbewusstes und auf Sicherheit ausgerichtete Produkt- und Technologielebenszyklen.

Tabelle 2 stellt die Technologie-Entwicklungen bei speziellen Effektpigmenten zusammen. Neben den einzelnen Pigmenttypen sind jeweils der

Zeitraum der Vermarktung und der Technologielebenszyklus erfasst. Es wird deutlich, dass einige der in der Vergangenheit entwickelten, produzierten und vermarkteten Effektpigmente ihren Lebenszyklus bereits abgeschlossen haben. Sie wurden von den Schicht-Substrat-Pigmenten vom Markt verdrängt. Von den einschichtigen speziellen Effektpigmenten konnte sich nur Bismutoxidchlorid in bestimmten Anwendungen behaupten. Neue Pigmente mit ihren Produkt- und Technologielebenszyklen dominieren inzwischen den Markt der speziellen Effektpigmente und erschließen sich immer neue Anwendungsfelder.

Tab. 2: Technologie-Entwicklungen bei speziellen Effektpigmenten^{a)}

Pigment-Typ	Zeitraum der Vermarktung	Technologielebenszyklus
Natürliches Fischesilber	1900 – 1950	Abgeschlossen
Basisches Bleicarbonat	1950 – 2000	Abgeschlossen
Bismutoxidchlorid	1960 fortlaufend	Reif
Metalloxid-Glimmerpigmente	1970 fortlaufend	Reif
Pigmente auf Basis von SiO ₂ -Flakes	2000 fortlaufend	Frühphase / reif
Pigmente auf Basis von Al ₂ O ₃ -Flakes	2000 fortlaufend	Frühphase / reif
Pigmente auf Basis von Borosilikat-Flakes	2005 fortlaufend	Frühphase / reif
Metalloxid-Aluminiumpigmente (1. Generation)	1990 fortlaufend	Reif
Metalloxid-Aluminiumpigmente (2. Generation)	2015 fortlaufend	Frühphase

a) Zusätzlich wurden hier die zwischen den speziellen Effektpigmenten und den Metalleffektpigmenten einzuordnenden Metalloxid-Aluminiumpigmente mit aufgenommen.

Eigene Darstellung

4 Zusammenfassung

Am Beispiel der vergleichsweise jungen Klasse der Effektpigmente lassen sich die wesentlichen Merkmale von Produkt- und Technologielebenszyklen vieler Farbmittel darstellen. Produktlebenszyklus und Technologielebenszyklus sind eng miteinander verbunden. Die vom Markt ausgehenden Anforderungen für neue oder aber etablierte Produkte verlangen eine ständige Überprüfung der zu deren Herstellung genutzten Technologien. Dabei sind nicht nur Qualitätskriterien und Herstellkosten von Wichtigkeit, sondern

auch die Bereitstellung von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen sowie deren Verbrauch, der Energieverbrauch, der CO₂-Fußabdruck sowie Transportaufwendungen und Umweltwirkungen (umweltrelevante Gewinnung von Ressourcen, Entsorgung bzw. Wiederverwertung von Nebenprodukten, Emissionen, Fragen der Toxizität). Zudem spielen Fragen der Weiterverwendung von Technologien für andere Produkte, Recycling, umweltgerechte Entsorgung sowie Rückbau und Nachnutzung der Anlagen und des Standorts eine zunehmend wichtigere Rolle.

Produktlebenszyklen von konventionellen Pigmenten (Weiß-, Bunt- und Schwarzpigmente) befinden sich meist in der reifen Phase bzw. der Phase der Sättigung (Commodities). Nur in wenigen Fällen wird an echten Nachfolgeprodukten und dazugehörigen neuen Technologien gearbeitet. Produktmodifizierungen sind im Fokus. Einzelne Produkte erreichen den Punkt des Marktaustritts (Einstellung der Vermarktung). Das gilt sowohl für anorganische als auch für organische Pigmente.

Spezielle Effektpigmente auf Basis des Schicht-Substrat-Prinzips befinden sich zumeist in der Frühphase des Technologielebenszyklus, aber zum Teil auch, wie im Fall der Glimmerpigmente, bereits in der reifen Phase. Neue Produkte und Technologien mit ihren Lebenszyklen sind hier zu erwarten.

Literatur

- Pfaff, G. (2007): Optische Prinzipien, Herstellung, Eigenschaften und Typen von speziellen Effektpigmenten. In: Pfaff, G. (Hg.): *Spezielle Effektpigmente. Grundlagen und Anwendungen* (2. Aufl.). Hannover, S. 5–91
- Pfaff, G. (2017): *Inorganic Pigments*. Berlin
- Pfaff, G. (2019): Anorganische Pigmente – aktueller Stand und neue Erkenntnisse. In: *Leibniz Online. Zeitschrift der Leibniz-Sozietät e.V.*, Nr. 36 (10.05.2019), S. 1–16. – URL: <https://leibnizsozietat.de/category/publikationen/leibniz-online/>
- Rüger, R.; Oldenburg, N.; Schulz, E.; Thurn-Schneller, A. (2004): Star Effects from Borosilicates. In: *Cosmetics and Toiletries Manufacture Worldwide*, No. 5, pp. 133–137
- Teaney, S., Pfaff, G., Nitta, K. (1999): New Pearlescent Pigments Using Innovative Substrates. In: *European Coatings Journal*, No. 4, pp. 90–96