24.11.2026

UV-C-Beständigkeit von Kunststoffen – von Laminaten über Konsumgüter bis zu Gehäusen und Bauteilen in der Elektrotechnik

Ergebnisse des IGF-Vorhabens UVCPLAST zur Wirkung entkeimender UV-C-Strahlung auf Kunststoffe

Harald Oehler, Fraunhofer LBF, E-Mail: harald.oehler@lbf.fraunhofer.de
Dr. Simon Gölden, Fraunhofer LBF, E-Mail: simon.goelden@lbf.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
Schlossgartenstraße 6
64289 Darmstadt

Kurzfassung

UV-C-Strahlung wird zur Desinfektion von Kunststoffoberflächen, Raumluft und Arbeitsbereichen eingesetzt. Gehäuse und andere Bauteile elektrotechnischer Geräte sowie Kunststoffoberflächen wie von Konsumgütern, Laminaten, Teppichen, Automobilinnenräumen und Konsumgütern können ihr direkt oder indirekt ausgesetzt sein, etwa an den Bestrahlungsgeräten selbst oder in desinfizierten Umgebungen. Im Vorhaben UVCPLAST wurde die Schädigung kommerzieller Thermoplaste mit einem am Fraunhofer LBF aufgebauten UV-C-LED-Prüfstand in Abhängigkeit von Werkstoff, Dosis, Bestrahlungsstärke, Wellenlänge und Additivierung untersucht. Polyolefine sind am beständigsten, Polyester am empfindlichsten. Marktübliche Lichtschutzmittel schützen Polyolefine effizient, die stark von UV-C geschädigten PBT und PET jedoch kaum. Sterisch gehinderte Amine (HALS), die üblicherweise bei der Stabilisierung gegen sichtbares Licht und UV-A und UV-B eingesetzt werden, können die Vergilbung bei UV-C-Strahlung sogar noch verstärken.

Hintergrund und Zielsetzung

UV-C-Strahlung (100 bis 280 nm) inaktiviert Mikroorganismen durch Schädigung ihrer Nukleinsäuren [1,2]. Quecksilberdampflampen werden zunehmend durch quecksilberfreie UV-C-LEDs ersetzt [3,4]. Unterschiedliche Expositionsfälle sind relevant: Zu desinfizierende Oberflächen, Gehäuse und Bauteile von UV-C-Geräten, Kabelummantelungen und weitere Bauteile von Geräten, die in desinfizierten Räumen betrieben werden. Da solare UV-C-Strahlung die Erdoberfläche nicht erreicht, wurden Kunststoffe bisher nicht dagegen stabilisiert. Exponierte Bauteile wurden aus inhärent beständigen Werkstoffen, insbesondere Metall, gefertigt. Für Silikonkautschuk in Isolatoren ist unter UV-C ein geringer Anstieg des Leckstroms, und verringerte thermische Stabilität beschrieben [5]. Für Thermoplaste fehlten zu Beginn des Projektes systematische Daten.

Prüfstand und Versuchsprogramm

Ein am Fraunhofer LBF entwickelter Prüfstand nutzt ein Array aus 36 UV-C-LEDs mit einem Emissionsmaximum bei 272 nm. Die Bestrahlungsintensität lässt sich damit von etwa 0,1 bis 50 mW/cm² einstellen und die Bestrahlungsdauer festlegen; untersucht wurden 0,3, 3 und 30 mW/cm² sowie intermittierende Zyklen mit 1 bis 12 min Bestrahlung je 24 h. Die Probenerwärmung betrug maximal 4 K. Die elektrische Leistung musste über die Projektlaufzeit

um bis zu 8 % abgesenkt werden, um die Bestrahlungsstärke konstant zu halten; eine regelmäßige Kalibrierung der UV-C-Strahler ist erforderlich.

Zum Vergleich wurden Proben gleicher Zusammensetzung auch bei 254 nm und in einem UV-A-Bewitterungsgerät (340 nm) bestrahlt. Untersucht wurden PBT, PET, PA6, PC, PP, PE-HD und PS (weiß und transparent) sowie glasfaserverstärktes Epoxidharz und Buchenholz. Ausgewählte Thermoplaste wurden mit unterschiedlichen Kombinationen und Mengen von UV-Absorbern, HALS, Antioxidantien und Hydroperoxidzersetzern compoundiert, um deren Stabilisierung zu verbessern. Bewertet wurde die UV-C-Bestrahlung bis zu einer Dosis von etwa 9000 kJ/m², die ungefähr 10 Jahren Einsatzdauer des Produktes bei zwei wirksamen Desinfektioszyklen pro Tag entsprechen. Bewertungsgrundlage waren die Farbänderung Δb*, der Glanz und IR-spektroskopisch erfassbare Oxidationsprodukte.

Werkstoffabhängige Schädigung

Die Schädigung hängt stark von der Polymerklasse ab. Anhand der OH-Bandenbildung zeigen PBT und PC eine ausgeprägte Photooxidation, PS und PA6 eine moderate und die Polyolefine PE-HD sowie PP kaum nachweisbare Veränderungen. Bei PBT deuten die IR-Spektren auf eine Photolyse der Esterbindung hin [6]. Die Vergilbung folgt dieser Reihenfolge nur teilweise (*Abbildung 2*): Bei 30 mW/cm² und hohen Dosen erreicht Δb* bei PBT etwa 18, bei PE-HD und PP etwa 7 bis 8 und bei PA6 sowie PC etwa 2 bis 3. Weißes PS liegt mit 22 bis 23 am höchsten, ist aber pigmentbeeinflusst. Bei transparenten Proben erfasst die Farbmessung nicht nur die geschädigte Oberfläche, sondern auch das Substrat.

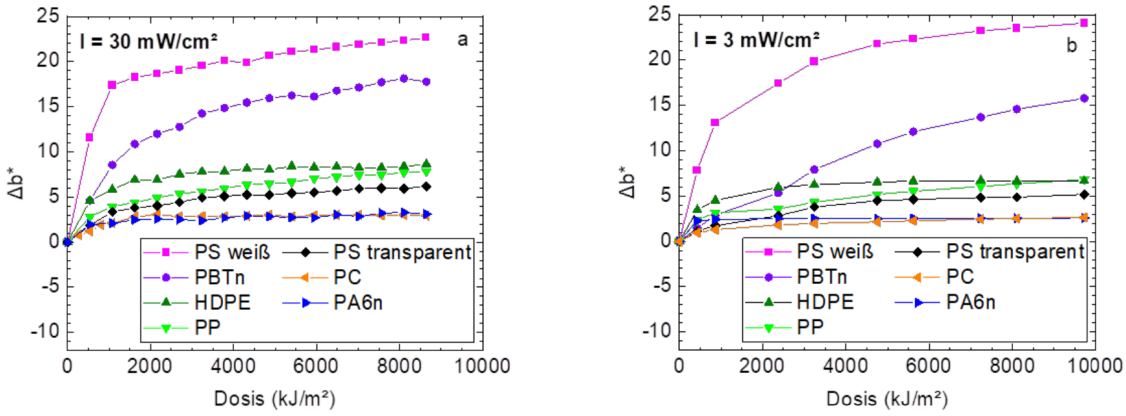

Abbildung 1 Farbänderung Δb über Bestrahlungsdosis von PS „weiß“, PS „transparent“, PBTn, PC, PE-HD, PA6 und PP für eine Strahlungsintensität von 30 mW/cm² (a) und 3 mW/cm² (b)*

Die geschädigte Schicht ist sehr dünn (PBT bei 272 nm: etwa 3 µm Eindringtiefe), bestimmt aber Optik und Haptik von Gehäuseoberflächen; bei PBT trat eine erhöhte Rauigkeit auf. Glasfaserverstärktes Epoxidharz vergilbte rasch und stark. Kurzwelligere Strahlung verursacht nicht zwangsläufig stärkere Schäden: „Orwet Orange“, eine Farbstandardbeschichtung, die in der Bewitterung bewusst schnell altert, reagierte kaum auf UV-C-Bestrahlung.

Wirksamkeit von Additiven

In PBT und PET lässt sich die Vergilbung unter UV-C mit handelsüblichen Additiven praktisch nicht verhindern, während unter UV-A bereits 0,5 % UV-Absorber die Verfärbung von PBT über 2000 h deutlich verringern. Ursache ist die sehr hohe Eigenabsorption der Polyester bei kurzen Wellenlängen. Erst 5 % UV-Absorber ergaben eine geringe, aber signifikante Stabilisierung, verbunden mit deutlicher Eigenfärbung und hohen Kosten durch den hohen Anteil Stabilisator in der Formulierung. Die normierten Farbverläufe aller Rezepturen sind nahezu gleichförmig (*Abbildung 3*); die Additive ändern den Abbaumechanismus nicht wesentlich. Dies deckt sich mit Arbeiten an Polycarbonat [7].

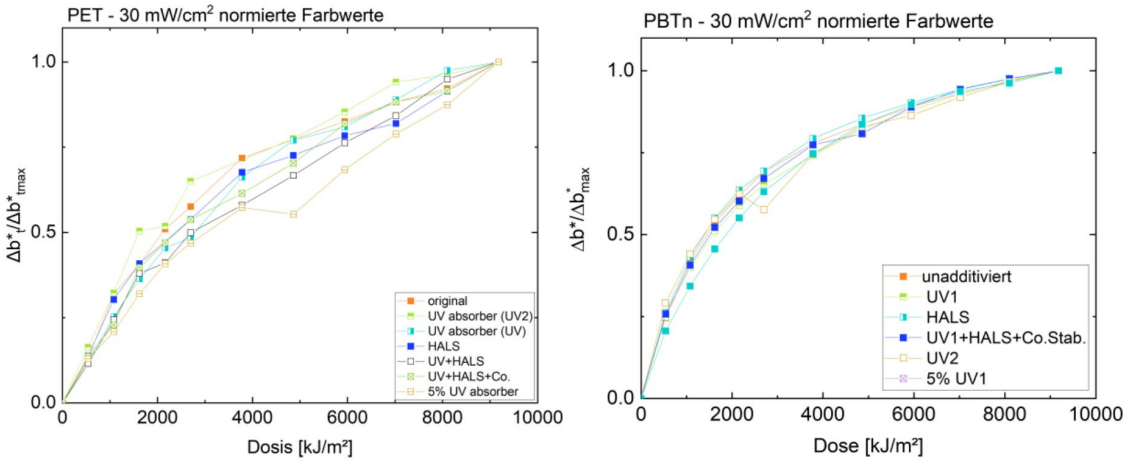

Abbildung 2 Normierte Farbwerte von PET (links) und PBTn (rechts). Für unterschiedliche Zusammensetzungen mit UV-Absorbern und Photostabilisatoren.

In Polyolefinen sind UV-Absorber dagegen sehr wirksam. Bei PE-HD senkte Tinuvin 1577 die maximale Farbänderung von 6,3 auf 0,4, schon 0,1 % genügten für eine signifikante Wirkung (*Abbildung 4*). HALS verstärkten die Vergilbung (Δb^*_{max} = 10,4), vermutlich durch ihren Abbau zu farbigen Produkten; dies entspricht Angaben der Patentliteratur [8]. Das untersuchte PP war ohne Additive farbstabil, zeigte bei verlängerter Bestrahlung bis etwa 104.000 kJ/m² aber eine wachsende Carbonylbande (vgl. [9]). In weißem PS beeinflussten Additive den Abbau wegen der starken Eigenabsorption bei 272 nm kaum.

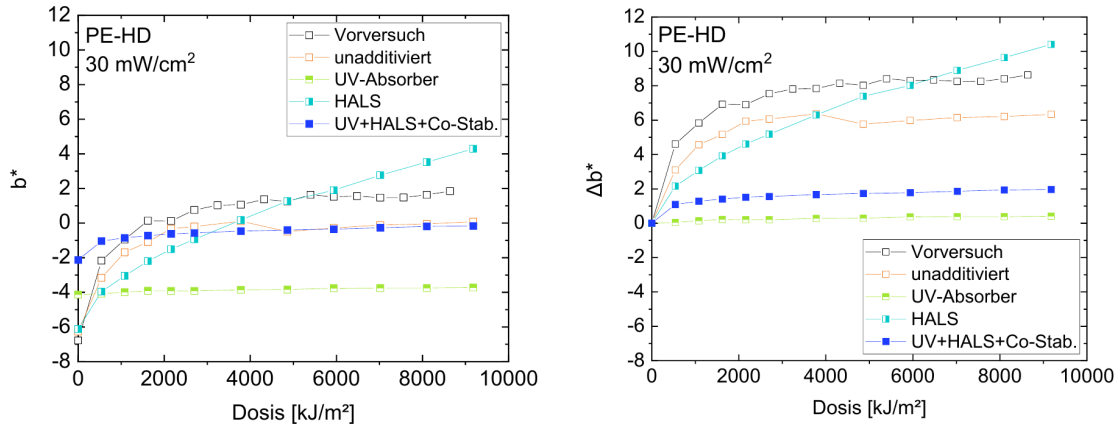

Abbildung 3 Links Verlauf der Farbwerte b, rechts Verlauf der Farbveränderung Δb* in unterschiedlich additiviertem PE-HD, Vergleich mit Ergebnissen für unadditiviertes PE-HD aus dem Vorversuch (schwarz)*

Einfluss von Wellenlänge und Intensität

Bei den Polyolefinen nimmt die Vergilbung mit abnehmender Wellenlänge zu (UV-A-Lampe, UV-C-LED mit 272 nm, Fluoreszenzstrahler mit 254 nm). Bei PET und unpigmentiertem PBT ist es umgekehrt (*Abbildung 5*): Die geringste Vergilbung entsteht bei kurzwelliger Bestrahlung, nicht wegen geringerer chemischer Schädigung, wie FTIR-Analysen zeigen, sondern vermutlich wegen der abnehmenden Eindringtiefe und damit geringerer Farbwirkung der geschädigten Schicht. Bei PBT nimmt die Vergilbung zudem bei gleicher Dosis mit der Bestrahlungsstärke zu, und intermittierende Bestrahlung führte zu weniger Carbonylgruppen als kontinuierliche. Ein niedrigerer Carbonylindex bedeutet jedoch nicht zwingend eine geringere Gesamtschädigung. PS und PC reagieren überwiegend auf die kumulierte Dosis.

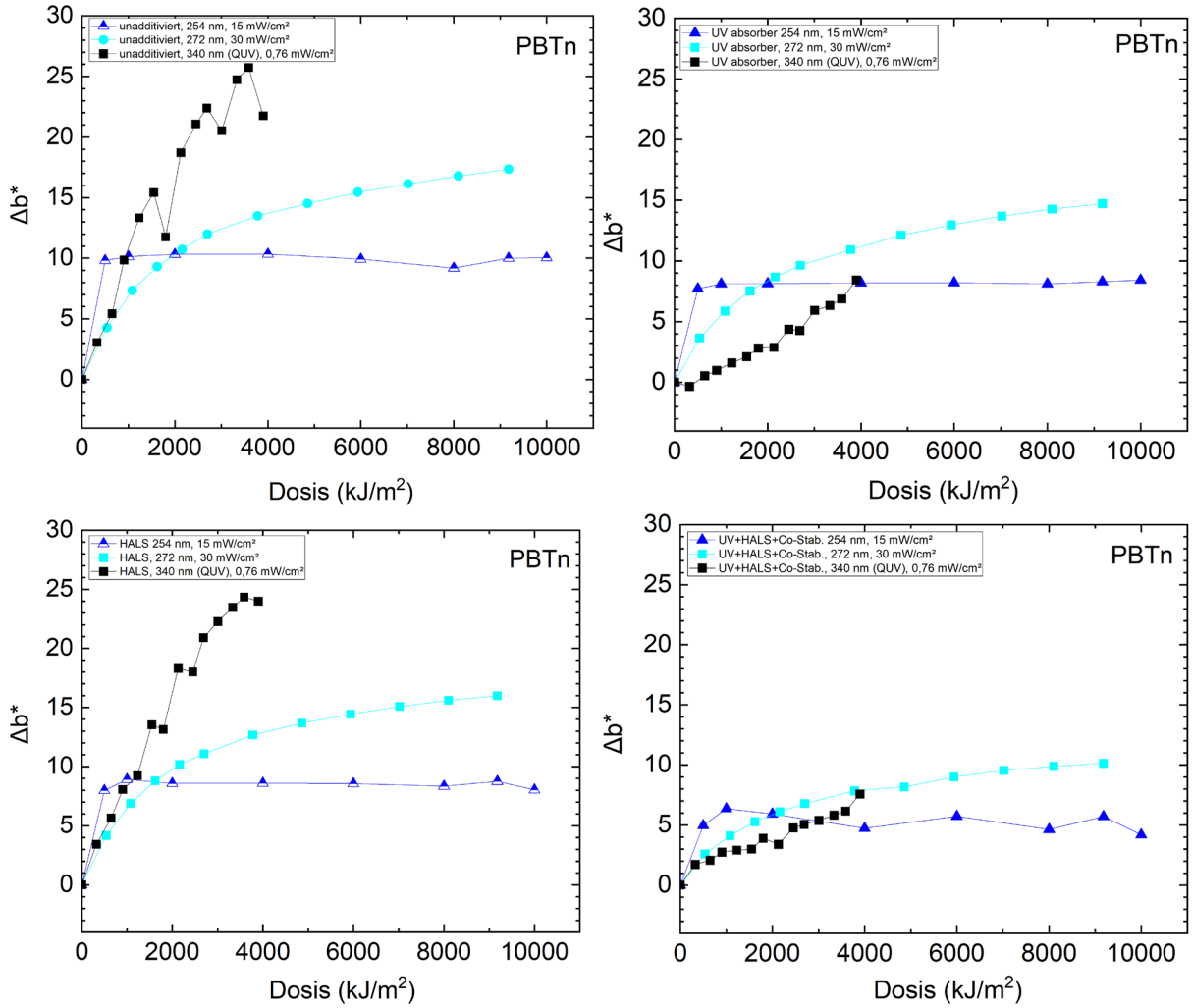

Abbildung 4 *Δb*-Entwicklung für PBTn bei unterschiedlichen Wellenlängen (UV-C 254nm; UV-C 272 nm und UV-A 340 nm Peak) gegen jeweils gleiche Gesamtdosis für vier verschiedene Rezepturen geplottet.*

Folgerungen für Kunststoffe, die in der Anwendung UV-C-desinfiziert werden

Polyolefine sind die robustere Werkstoffklasse. PP kann hinsichtlich der Farbstabilität unadditiviert eingesetzt werden, PE-HD profitiert von niedrig dosiertem UV-Absorber, auf HALS sollte verzichtet werden. Polyester sind für optisch relevante Oberflächen in Strahlernähe kritisch, da handelsübliche Additive kaum schützen; für PBT werden Kombinationen aus phenolischem Antioxidans und UV-Absorber empfohlen. Bei PC weisen die IR-Befunde auf eine deutliche chemische Schädigung hin, obwohl die Vergilbung transparenter Proben gering wirkt.

Bei der Werkstoffauswahl werden in der Praxis weitere Eigenschaften zu berücksichtigen sein: angefangen von mechanischen Kennwerten über Flammschutz und elektrische Eigenschaften bis hin zum Kriechverhalten. Bei der Auswahl und Optimierung für Ihren konkreten Anwendungsfall stehen die Experten des Fraunhofer LBF gerne zur Seite.

Bei der Bewertung der Lichtstabilität sind Wellenlänge der Strahlungsquelle, Bestrahlungsstärke und Zyklenprofil am Bauteil zu berücksichtigen; Prüfungen bei 254 nm und 272 nm sind nicht gleichwertig, und UV-A-Bewitterungsdaten sind nicht auf UV-C übertragbar. Änderungen mechanischer und elektrischer Kennwerte, etwa Isolations- oder Kriechstromeigenschaften, waren nicht Gegenstand des Projekts. Während der Projektarbeit entstand die Norm DIN EN IEC 60068-2-87:2025-08 zur UV-C-Bestrahlung von Kunststoffen bei der Wellenlänge von 254 nm (Quecksilber-Niederdruckdampflampen), die jedoch nicht auf andere Wellenlängen, wie 260 bis 275 nm von UV-C-LEDs anwendbar ist. Die Ergebnisse aus UVCPLAST wurden in den DIN-Ausschuss NA 054-01-04 AA eingebracht.

Förderung und Projektpartner

Das Vorhaben 01IF22999N „Wirkung entkeimender UV-C-Strahlung auf Kunststoffe (UVCPLAST)“ wurde am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF bearbeitet. Es wurde als Vorhaben der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) über die Forschungsgesellschaft Kunststoffe e.V. (FGK) und die DLR vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Laufzeit betrug 36 Monate (01.06.2023 bis 31.05.2026). Ein projektbegleitender Ausschuss aus Industrieunternehmen unterstützte die Arbeiten. Grundlage dieses Kurzberichts ist der Schlussbericht vom 21.10.2026.

Literatur

1. J. Sério et. Al., UV-C LED wavelength effects on inactivation kinetics, DNA damage and membrane integrity in drinking water indicator bacteria. Scientific Reports. 2026, 16.
2. K.D. Rauch et. Al., A critical review of ultra-violet light emitting diodes as a one water disinfection technology. Water Reserach. 2024, 25.
3. [Online] https://klaus-sedlacek.de/2025/09/17/vom-labor-in-den-alltag-uvc-leds-zur-desinfektion-auf-dem-weg-in-die-breite-anwendung.
4. [Online] https://www.deutschesgesundheitsportal.de/2025/09/16/vom-labor-in-den-alltag-uvc-leds-zur-desinfektion-auf-dem-weg-in-die-breite-anwendung.
5. Z. Farhadinejad, 5, 2012, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Bd. 19, S. 1741-17449.
6. Rivaton, Agnes. Photochemistry of poly(butyleneterephthalate): 2 Identification of the IR-absorbing photooxidation products. Polymer Degradation and Stability. 1993, S. 297-310.
7. H. de Brouwer, The effects of UVC irradiation on the properties of thermoplastics. Polymer Degradation and Stability. 2024, 222, S. 110703.
8. Cytec Industries, Inc. Compositions and methods for protecting organic polymeric materials from the deleterious effects exposure to UV-C- light. WO2022/115578 A1 2022.
9. M. V. Basaglia et al. Improving UV-C stability in polypropylene through synergistic phenolic or hydroxylamine-based additives with UV absorbers. Express Polymer Letters. 2025, Bd. 19, 2, S. 124-139.