

Photopolymere in der Industrie

Bernd Strehmel

Die Ortsselektivität der Photopolymerisation macht sie den üblichen thermisch initiierten Vernetzungen von Polymeren überlegen. Industrielle Anwendungen reichen von der Informationsspeicherung über Lithografie und Lacke bis zu Dentalkompositen.

◆ Seit dem ersten Patent zur photochemischen Initiierung von radikalischen Polymerisationen sind mehr als 65 Jahre vergangen.¹⁾ Seitdem stieg die Zahl an Patenten stetig; der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Schutz von Anwendungen und auf der Wirkungsweise des Photoinitiators.²⁾ Indem Licht am gewünschten Reaktionsort die Polymerisation startet, bieten photoinduzierte Po-

sie sich als energiearme Trocknungstechnik durch.⁴⁾ Dafür nötig waren funktionalisierte mehrfunktionelle Monomere, die nach Photoinitiierung effizient vernetzen und den aufgetragenen Lackfilm verfestigen. Die Vernetzung erfolgt dabei radikalisch oder kationisch. Der Anteil radikalisch vernetzender Systeme liegt jedoch höher, da diese vielseitigere Funktionalisierungsmöglichkeiten bieten.

Die photoinduzierte Polymerisation, insbesondere die Verfahren für die Informationsspeicherung profitierten davon, dass sich Laser erfolgreich in der Chemie etablierten. So generiert die Druckindustrie in einer Kombination aus einem Halbleiterlaser und digitaler Bebilderungstechnik – der Computer-to-Plate (CtP)-Technik – lithografische Materialien.⁵⁾ Die Holografie setzt die Photopolymertechnik für den Markenschutz ein.⁶⁾

Weitere Lichtquellen für die Photopolymerisation sind LEDs, die mit einer Halbwertsbreite von 30–50 nm emittieren und je nach Halbleitermaterial den ultravioletten, sichtbaren und Nahinfrarot-Spektralbereich bis etwa 1000 nm abdecken. Allerdings emittieren LEDs im Vergleich zur Quecksilberlampe recht schwach. Deshalb reicht die Empfindlichkeit der bisher eingesetzten UV-Initiatoren²⁾ mitunter nicht aus, um eine effiziente Vernetzung in einem kleinen Zeitfenster zu erzielen. Nötig sind neue, ultraempfindliche Photoini-

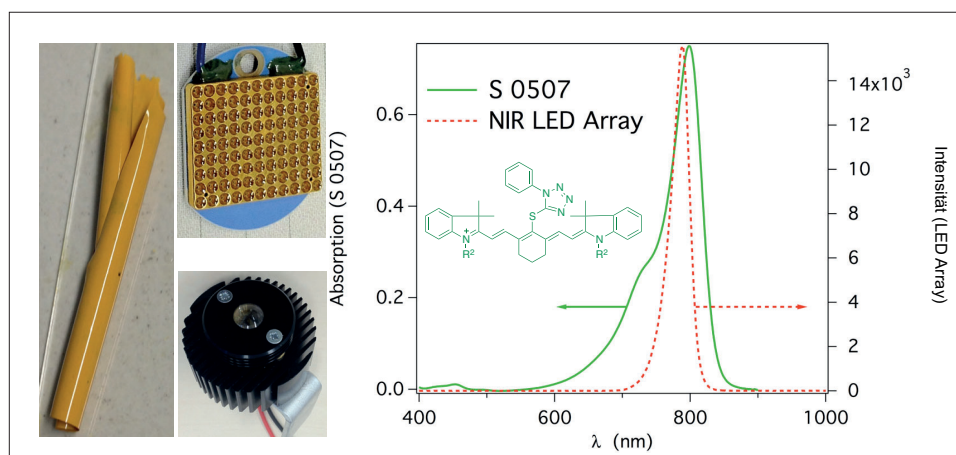


Abb. 1. Absorptionsprofil des NIR-Farbstoffs S 0507 (CAS #: 440102–72–7) und Emissionsprofil eines NIR-LED-Arrays, der zur photoinduzierten Härtung eines gelb pigmentierten Lacks (links) verwendet wurde.

◆ QUERGELESEN

- » Photopolymere im UV und sichtbaren Spektralbereich zählen heute zu den empfindlichsten silberfreien Aufzeichnungsverfahren. Mit ihnen arbeiten Informationsaufzeichnungsverfahren und Anwendungen, die schnelle Prozesszeiten erfordern.
- » Strengere Umweltgesetze verlangen von der Lackchemie energieschonende Trocknungstechniken: Hier helfen Photopolymere.
- » Der Prototypenbau besitzt in der Medizin und im Maschinenbau eine Schlüsselfunktion, Photopolymere werden dazu erfolgreich eingesetzt. Davon profitieren auch Anwendungen, die eine hohe Tiefenhardtung erfordern.

lymerisationen den Vorteil, ortsselektiv zu sein. Die Vernetzung lässt sich gezielt starten und beenden – und das überwiegend bei Raumtemperatur. Photoinitiatoren, deren Spaltung Benzoylradikale generiert, wurden innerhalb von mehreren Jahrzehnten zu einer leistungsstarken Klasse von UV-Photoinitiatoren entwickelt.

In vielen Anwendungen initiieren Photoinitiatoren in Kombination mit Quecksilberhöchstdrucklampen Photopolymerisationen. Diese Lichtquellen sorgten dafür, dass sich die UV-Technik etablierte.³⁾ In der Lackindustrie setzten

tiatoren, die in der Grafikindustrie bereits etabliert sind.^{5a)}

LEDs haben gegenüber einem Breitbandstrahler – etwa dem Quecksilberstrahler, der einen Emissionsbereich von mehreren 100 nm abdeckt – einen Vorteil: Maßgeschneidertes Design der lichtabsorbierende Komponente – dem Photoinitiator – ermöglicht eine nahezu quantitative Absorption der emittierten Strahlung, die für chemische Reaktionen verwendet wird (Abbildung 1).

Industrielle Anwendungen von Photopolymeren basieren heute auf einer radikalischen oder/und kationischen Polymerisation.^{2,7)} Ionisch initiierte Polymerisationen sind unempfindlich gegenüber der inhibierenden Funktion des Sauerstoffs. Allerdings sind diese Systeme sehr empfindlich gegenüber Luftfeuchtigkeit. Die inhibierende Wirkung des Sauerstoffs führt andererseits zu einer hohen Lagerstabilität, wenn aerobe Inhibitoren wie sterisch gehinderte Phenole in radikalisch polymerisierbaren Systemen enthalten sind. Sollte die Sauerstoffpermeabilität der Photopolymerschicht zu gering sein, sind anaerobe Inhibitoren wie TEMPO notwendig, damit das Material eine akzeptable Lagerstabilität besitzt.^{5a)}

Vinylmonomere sind für Photopolymerisationen vielseitig funktionalisierbar und damit für viele unterschiedliche industrielle Anwendungen geeignet. Dazu zählen Lackierungen im Automobilbau,^{3,4)} Versiegelungen von Fußböden,^{3,4)} Möbellackierungen,^{3,4)} strahlenhärtende Druckfarben,^{3,4,8)} grafische Aufzeichnungsmaterialien,⁵⁾ Holografie,⁶⁾ die 3-D-Lithografie/Stereolithografie⁹⁾ zum Aufbau von Prototypen in der Medizin und im Maschinenbau,¹⁰⁾ Dentalkomposite¹¹⁾ sowie Funktionsklebstoffe.¹²⁾

Photopolymere zur Informationsaufzeichnung

◆ Etwa 90 Prozent aller lithografischen Druckplatten werden heute mit digitaler Bebilderung, der

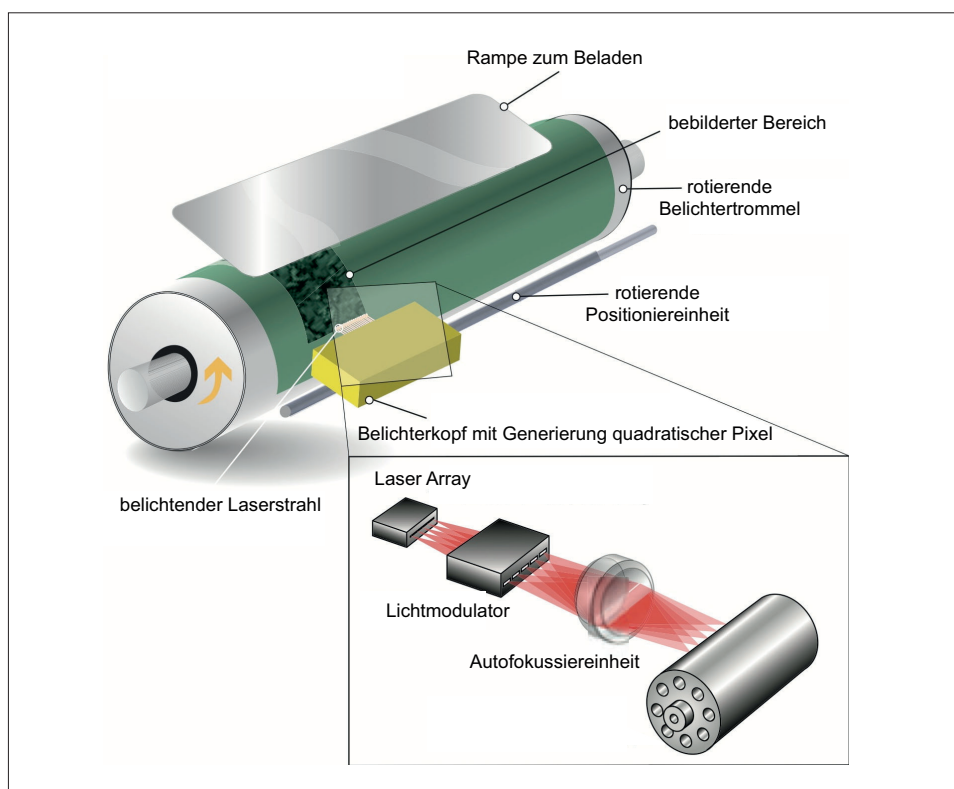


Abb. 2. Digitale Bebilderung einer lithografischen Druckplatte (grüner Bereich). Die Laserbelichtungseinheit (gelb) schreibt kontinuierlich ein Bild mit dem Multi-Beam-Kopf entlang der Platte, wobei dieser entlang der rotierenden Positioniereinheit bewegt wird und die Trommel mit der aufgespannten Platte rotiert. Der Ausschnitt zeigt das Arbeitsprinzip, um den Laserstrahl für die Belichtung zu modulieren.

(Nach: www.kodak.com)

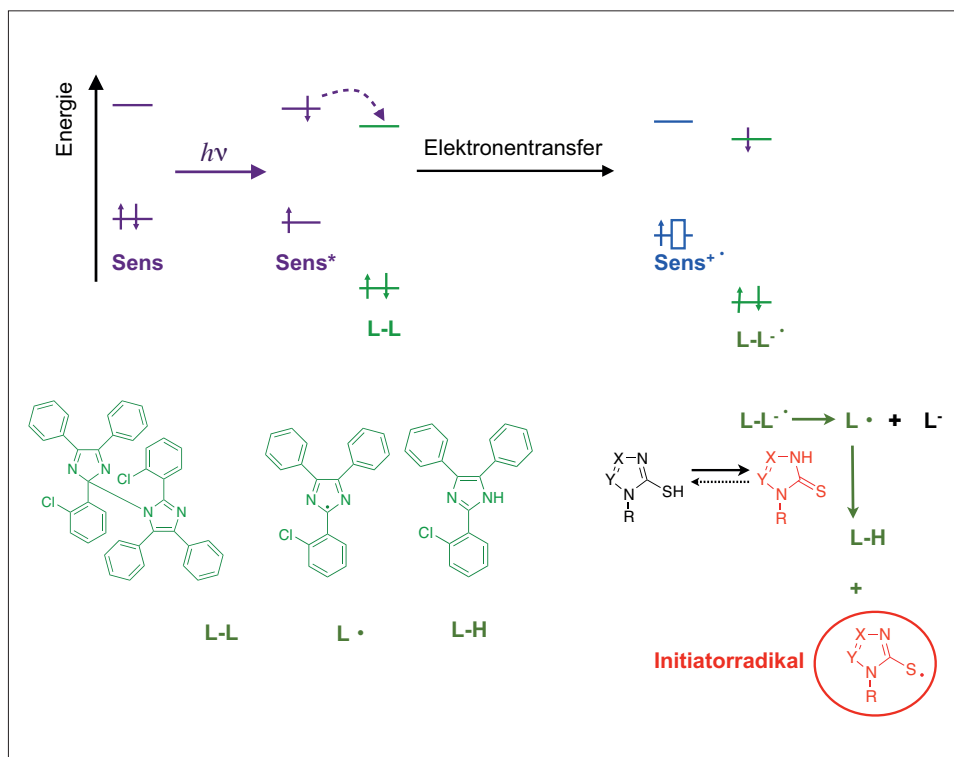


Abb. 3. Sensibilisierte Radikalbildung in einem Violett-Photopolymersystem (405 nm). Anregung des Sensibilisators (Sens) in den angeregten Zustand $Sens^*$ führt zum Elektronentransfer auf einen Elektronenakzeptor (L-L), der in ein Lophinanion (L^-) und ein Lophylradikal ($L^\bullet$) zerfällt. $L^\bullet$ addiert sich an die tautomere Thionform einer heterocyclischen Mercaptoverbindung, wobei initierende Thiylradikale gebildet werden. Dieser Mechanismus ist irreversibel und läuft nur in eine Richtung ab.

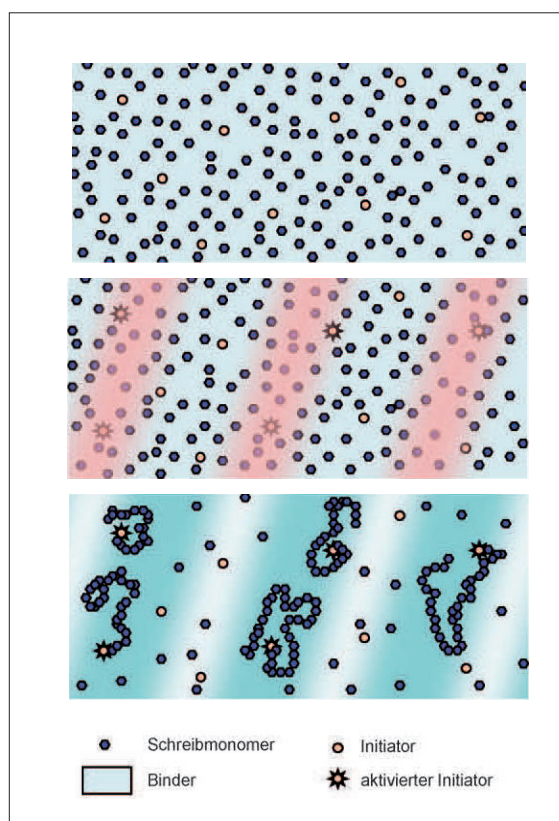


Abb. 4. Reaktions-Diffusions-Modell der Hologrammbildung in Photopolymeren. Oben: Photopolymer mit Schreibmonomeren, Initiatoren und Binder; Mitte: Überlagerung von zwei kohärenten Laserstrahlen erzeugt Interferenzmuster und regt bei konstruktiver Interferenz den Initiator an; unten: Photopolymerisation führt zur Diffusion von Schreibmonomeren zu den Makroradikalen und somit zu einer Anreicherung der Schreibmonomereinheiten in den hellen Bereichen.⁶⁾

Computer-to-Plate(CtP)-Technik, verarbeitet. Dazu dienen Halbleiterlaser, die entweder bei 405 nm (Violett-Photopolymertechnik) oder 810 und 830 nm (NIR-Photopolymertechnik) emittieren.⁵⁾ Die Belichtung einer lithografischen Druckform muss in wenigen Minuten abgeschlossen sein; ein Rasterpunkt der Größe $20 \times 20 \mu\text{m}$ erfordert deshalb eine Belichtungszeit von nur einigen sub-ms. Dieses Verfahren ist heute vollautomatisiert und erfolgt entweder über Flachbett- oder Trommelbelichter (Abbildung 2, S. 129).

Die verwendeten Photopolymermaterialien arbeiten äußerst zuverlässig. Violett-Photopolymere besitzen eine Empfindlichkeit von 30 bis $80 \mu\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$; die Violett-Photopolymertechnik zählt so zu den empfindlichsten silberhalogenidfreien Aufzeichnungsverfahren. NIR-Photopolymere sind unempfindlicher, ihre Werte liegen zwischen 50 und $200 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$.⁵⁾ Allerdings ist die Auflösung der NIR-Systeme in Kombination mit einem 830-nm-Bebildungssystem wesentlich besser, was die Akzeptanz im qualitativ hohen Akzidenzdruck erklärt.

Typische Sensibilisatoren für die Bebilderung bei 830 nm sind Polymethinfarbstoffe. Die Radikalbildner sind Akzeptormoleküle und von Triazinen oder Oniums Salzen abgeleitet – üblicherweise Iodonium- oder Sulfoniumsalze. Diese Kombination ergibt bei Laseranregung bei 810 oder 830 nm ein ΔG_{el} von etwa 0 eV .^{5b)}

Violett-Photopolymere werden dagegen als Sensibilisatoren ungesättigte Verbindungen, die von Distyrylbenzenderivaten, Cumارين oder Oxazolen abgeleitet sind.^{5a)} Als Radikalbildner dient bevorzugt *o*-Cl-HABI(L-L), das nach Elektronenaufnahme von einem angeregten Sensibilisator Lophylradikale ($\text{L}^\cdot$) bildet. Diese reagieren mit einer heterocyclischen Mercapto-Thionverbindung zu Thiylradikalen, die effizient die Vernetzung des Monomeren initiieren (Abbildung 3, S. 129).^{5c)}

Die Holografie setzt Laser mit einer hohen Kohärenzlänge ein.⁶⁾ Die Überlagerung zweier Laserstrahlen erzeugt ein Interferenzmuster, wenn die Strahlen in der Phase überlappen. Diese Systeme verwenden ein Photoinitatorsys-

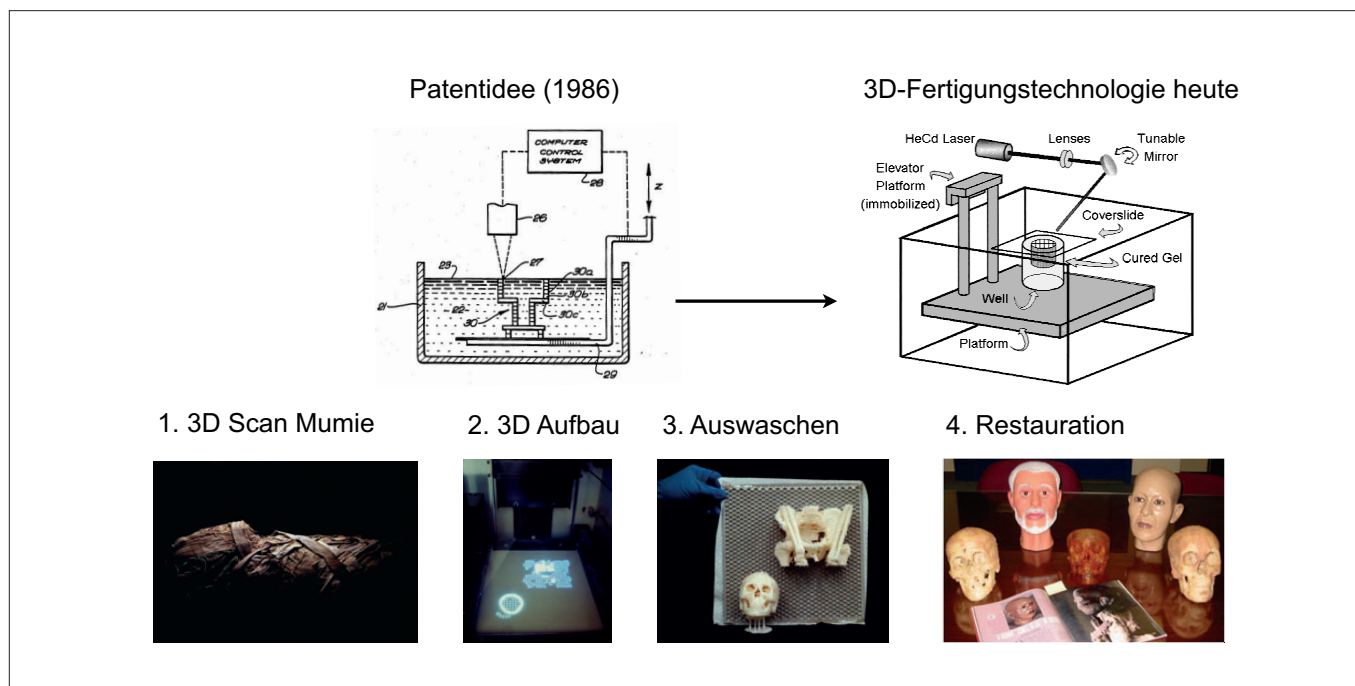


Abb. 5. 3-D-Bebildung, die bereits im Jahr 1986 patentiert und zur modernen Technik entwickelt wurde.⁹⁾ Der untere Teil des Bildes zeigt die Restauration eines Mumienkopfs: Ein CAD-Scan sammelt die erforderlichen Daten der Mumie (links unten), diese werden an einen 3-D-Belichter für Photopolymerisation übergeben, der schichtweise das Bild aufbaut. Auswaschen macht das Skelett für die Restauration zugänglich.¹⁵⁾

(Fotos: SGL Inc. und D. C. Neckers; www.sglinc.com/Home/AboutUs/DRDCNeckers.aspx)

tem, das bevorzugt im sichtbaren Spektralbereich absorbiert. Der Grund dafür ist, dass in diesem Spektralbereich Laser mit akzeptabler Leistung und hoher Kohärenzwellenlänge verfügbar sind. Bei der Bildung des Phasenhologramms muss die Diffusion des Schreibmonomeren in dem Bereich, in dem die Phasen der beiden Laserstrahlen mit gleicher Amplitude überlappen, schneller sein als dessen Reaktion durch Polymerisation (Abbildung 4).⁶⁾

Die Schreibmonomere sind ähnlich den CtP-Materialien in ein polymeres Bindemittel eingebettet.

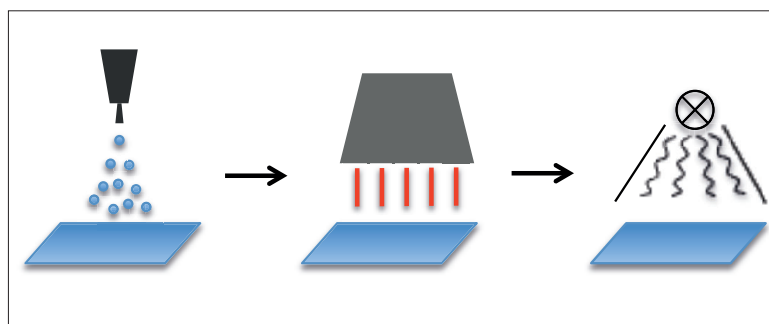


Abb. 6. Applizieren eines Pulverlacks auf einem Substrat, Aufschmelzen und anschließende Belichtung.

Ein Auswaschen der unbelichteten Bereiche nach der Belichtung ist nicht nötig. Zur Fixierung des Bildes durch Photopolymerisation

reicht eine nichtkohärente Lichtquelle, die kein Hologramm erzeugt.



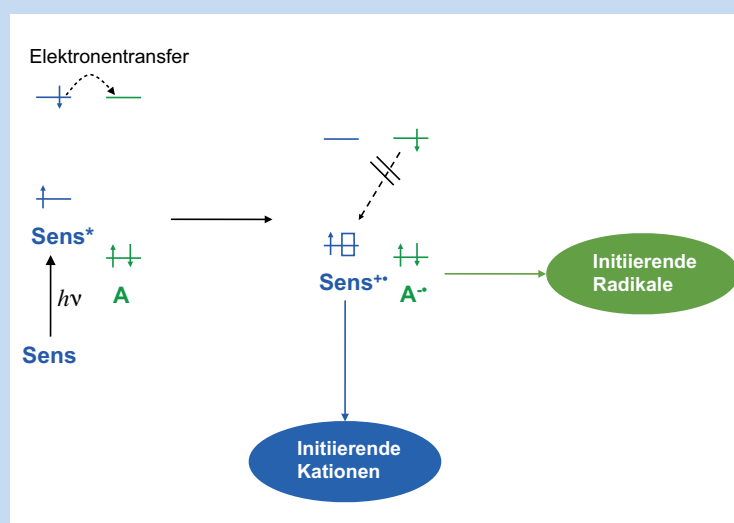
◆ Exkurs: Kinetik der Photopolymerisation

Initiierende Spezies für die Photopolymerisation entstehen direkt durch Photolyse¹⁾ oder indirekt über einen Sensibilisierungsmechanismus.^{2,5)} Im letzteren Fall bestimmen die Anregungsenergie des Sensibilisators (E_{00}) und die elektrochemischen Potenziale des Sensibilisators (Halbstufenoxidationspotenzial E_{ox}) sowie des Initiators (Halbstufenreduktionspotenzial E_{red}) die freie Reaktionsenthalpie des Elektronentransfers (ΔG_{el}): $\Delta G_{el} = F(E_{ox} - E_{red}) - E_{00} + E_c$. Der Coulomb-Term (E_c) ist für Systeme von Bedeutung, bei denen $\Delta G_{el} \approx 0$ wird, was bei den meisten NIR-Photopolymeren der Fall ist.^{5b)} Der Mechanismus (Abbildung rechts), der aus dem Singulettzustand abläuft, erfordert einen schnellen Zerfall des oxidierten Sensibilisators $Sens^+$, damit die Effizienz der Elektronenrückübertragung möglichst gering ist. Alternativ kann die Zugabe eines Reduktionsmittels die Spezies $Sens^+$ zu $Sens$ zurückbilden. Das Reduktionsmittel wird dabei oxidiert, und es entstehen zusätzlich initiierende Radikale.⁵⁾ Geeignet für diese Reaktion sind beispielsweise Borate.¹³⁾

Die Bildung des Polymerradikals ist allerdings komplex, da mehrere Prozesse erforderlich sind, um ini-

tierende Radikale zu erzeugen. Die entscheidenden Reaktionsschritte zur Bildung von Initiatorradikalen sind diffusionskontrolliert und werden deshalb durch die Beweglichkeit einer einzelnen Spezies in der Matrix maßgeblich beeinflusst. Allerdings ist die Bildung initiierender Radikale auch von der Viskosität und der Beweglichkeit der Umgebung abhängig; diese ändert sich zudem im Fortgang der Bestrahlung. Neben der chemi-

sehen Reaktivität bestimmen deshalb in diesen Systemen auch Transportvorgänge maßgeblich die Effizienz. Diese Zusammenhänge gelten im Übrigen auch für das Kettenwachstum und den Kettenabbruch. Generell ist deshalb die komplette kinetische Beschreibung derartiger Systeme problematisch, zumal in der Realität oft keine quasistationären Bedingungen bei der Polymerradikalkonzentration vorliegen.



Sensibilisierte Generierung von Radikalen und Kationen mit einem Sensibilisator $Sens$ und einem Elektronenakzeptor A . Anregung von $Sens$ führt zum angeregten Zustand $Sens^*$, der ein Elektron auf A überträgt. Die reduzierte Form A^- zerfällt schnell in initiierende Radikale, während initiierende Kationen aus der oxidierten Form von $Sens^+$ gebildet werden. Der schnelle Zerfall von $Sens^+$ führt dazu, dass dieser Reaktionsweg irreversibel ist.

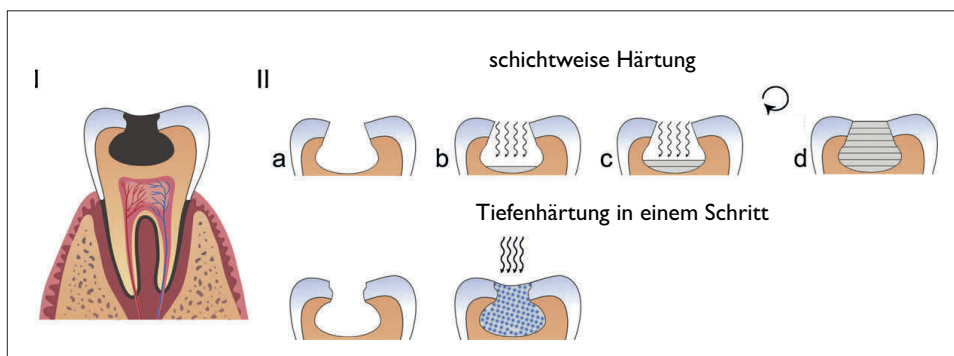


Abb. 7. Kariesbehandlung (dunkler Bereich in I) mit einem Photoinitiatorsystem, das mit blauem Licht härtet (II) und im oberen Fall ein Applizieren Schicht für Schicht erfordert. Blaues Licht innerhalb des Zahns mit einem Up-Conversion-Material zu generieren, erlaubt das Härten in einem Schritt auch bei größeren Schichtdicken im unteren Beispiel.^{11c)}

Stereolithografie

◆ Die Stereolithografie ist eine besondere Form der 3-D-Drucktechnik. Sie baut das 3-D-Objekt schichtweise durch photoinduzierte Polymerisation auf. Das erste Patent zur Stereolithografie erschien im Jahr 1986.⁹⁾ Ein durch Computerdesign generiertes 3-D-Bild liefert die räumlichen Daten. Die Hardware bearbeitet diese und steuert schichtweise die Belichtung in x-y-Richtung, wobei der räumliche Aufbau in z-Richtung erfolgt. Die Stereolithografie hat Potenzial, um Prototypen im Maschinenbau und in der Medizin zu generieren. Letzteres ist bei der 3-D-Fertigung von Mustern für Knochenimplan-

tate bei Krebspatienten oder Unfallopfern von Bedeutung. Auch für andere Anwendungen wie das Konservieren von archäologischem Material eignet sie sich (Abbildung 5, S. 130).¹⁵⁾

Lackierungen und strahlenhärtbare Druckfarben

◆ Photopolymere sparen im Vergleich zur physikalischen Trocknung Energie beim Trocknen von Lacken. Der Grund dafür ist, dass keine Energie benötigt wird, um die sonst üblichen flüchtigen organischen Verbindungen (volatile organic compounds, VOC) zu entfernen. Diese VOC-freie Produktionstechnik wird deshalb als chemisch trocknend bezeichnet.⁴⁾ Es gibt Ansätze, die Photopolymertechnik in der Pulverlackierung einzusetzen, die kein Lösungsmittel zum Applizieren erfordert. Dafür sind Pulvergemische erforderlich, um die photoinduzierte Vernetzung in der Schmelze ab etwa 90 °C zu starten (Abbildung 6, S. 131).^{3,4)}

Im UV-Druck verkürzen Photopolymere die Produktionszeiten drastisch.⁸⁾ Weiterhin sind für Lacke solche Photopolymere interessant, die NIR-Licht absorbieren.¹⁶⁾ Damit können einige Nachteile der UV-Technik kompensiert werden: Das Einarbeiten von Gelbpigmenten und UV-Schutzstoffen ist innerhalb eines höheren Toleranzfensters möglich, was in einer Machbarkeitsstudie diskutiert wurde. Allerdings erfordert das für die NIR-

Photopolymertechnik weitere intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Dentalkomposite

◆ Ein Teil der Dentalkomposite wird heute durch Photopolymer-technik gehärtet. Nötig ist jedoch zuvor eine sorgfältige toxikologische Prüfung von Monomeren, Photoinitiator-komponenten und Photoprodukten. Abbildung 7 zeigt den Aufbau einer im Schichtverfahren gehärteten Dentalmischung, für die ein gering ausbleichender Photoinitiator und ein Photoinitiator mit hoher Tiefenhardtung zum Einsatz kamen.¹¹⁾ Die Eindringtiefe des Anregungslichts ist begrenzt durch das Lambert-Beer'sche Gesetz. Deshalb sind bei Tiefenhardtungen Systeme interessant, bei denen der Photoinitiator bei der Einstrahlwellenlänge ausbleicht. Bei Dentalkompositen hat sich über viele Jahre ein System aus Campherchinon und einem Aminoben-zoesäureester bewährt.

Ausblick

◆ Der Schwerpunkt bei weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten liegt darauf, die Empfindlichkeit der Photopolymerisation zu verbessern. Ziel ist der Einsatz von energiesparenden LEDs im UV, im Sichtbaren und im NIR. Die Entwicklung von Halbleiterlasern wird auch bei Photopolymeren zu neuen Anwendungen führen, wobei die flächenmäßige Belichtung¹⁷⁾ im NIR einen entscheidenden Beitrag leisten wird. Gerade bei den Lacken sollten viele Produkte davon profitieren. Es bleibt zu hoffen, dass die Weiterentwicklung solcher Laser fortschreitet, die eine simultane Zweiphotonenanregung von Photopolymeren ermöglichen – und das in sich wiederholenden industriellen Produktionszyklen mit hoher Zuverlässigkeit. Das eröffnet neues Potenzial in der Datenspeicherung und 3-D-Nanotechnik. Erste Ansätze sind erfolgversprechend.¹⁸⁾

GDCh-Kurs
Industrielle Anwendungen von Photopolymeren
 Verständnis und Anwendungsprinzipien (035/14)
23. - 24. Juni 2014, Frankfurt am Main
 Leitung: Prof. Dr. Bernd Strehmel

Highlights:
 Moderne Lichtquellen
 Informationsaufzeichnung und -speicherung
 Lackanwendungen
 Strukturierung und 3D Druck
 Photopolymere in der Medizintechnik

Anmeldung/Information:
 Tel.: 069/7917-364
 E-Mail: fb@gdch.de
 www.gdch.de/fortbildung

Literatur

- 1) P. M. M. Renfrew, *US 2448828 (1948)*, *Ass. Du Pont de Nemours & Company*.
- 2) J.-P. Fouassier, J. Lavelée, *Photoinitiators for Polymer Synthesis: Scope, Reactivity and Efficiency*, Wiley-VCH, Weinheim, 2012.
- 3) R. Schwalm, *UV Coatings: Basics, Recent Developments and New Applications*, Elsevier Science, Amsterdam, 2006.
- 4) T. Brock, M. Grotekleas, P. Mischke, B. Strehmel, *Lehrbuch der Lacktechnologie*, 4. Auflage, Vincentz Network, Hannover, 2012.
- 5) a) H. Baumann, unveröffentlicht, zur Publikation bei Chem. Unserer Zeit akzeptiert; b) B. Strehmel, D. Keil, S. Ernst, K. Reiner, H. Lindauer, H. Baumann, unveröffentlicht, zur Publikation bei Z. Phys. Chem. akzeptiert; c) S. Berdzinski, N. Strehmel, H. Lindauer, V. Strehmel, B. Strehmel, unveröffentlicht, zur Publikation bei Photochem. Photobiol. Sci. eingereicht.
- 6) F.-K. Bruder, R. Hagen, T. Rölle, M.-S. Weiser, T. Fäcke, *Angew. Chem.* 2011, 123, 4646.
- 7) a) J. V. Crivello, K. Dietliker, *Photoinitiators for free radical cationic and anionic photopolymerisation* [Hrsg.: G. Bradley], John Wiley & Sons, New York, Vol. III, 1999; b) K. Dietliker, *A Compilation of Photoinitiators Commercially Available for UV Today*, Sita Technology Ltd, Edinburgh, UK, 2002; c) V. Strehmel in *Advanced Functional Molecules and Polymers* [Hrsg.: H. S. Nalwa], American Scientific Publishers, Gordon and Breach, 2003.
- 8) a) P. Glockner, *Radiation curing. Coating and printing inks*, Vincentz Network, Hannover, 2008; b) H. Kiphphan, *Handbuch der Printmedien: Technologien und Produktionsverfahren*, Springer, Berlin, 2000.
- 9) a) C. W. Hull, *Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography*, US 4575330, UVP, Inc, 1986; b) J. H. Lee, R. K. Prud'homme, I. A. Aksay, *J. Mater. Res.* 2001, 16, 3536.
- 10) A. Gebhardt, *Generative Fertigungsverfahren: Rapid Prototyping – Rapid Tooling – Rapid Manufacturing*, Hanser-Verlag, München, 2008.
- 11) a) N. B. Cramer, J. W. Stansbury, C. N. Bowman, *J. Dent. Res.* 2012, 90, 402; b) K. Ikemura, T. Endo, *Dent. Mater.* 2010, 29, 481; c) A. Stepuk, D. Mohn, R. N. Grass, M. Zehnder, K. W. Krämer, F. Pellé, A. Ferrier, W. J. Stark, *Dent. Mater.* 2012, 28, 304.
- 12) W. Brockmann, P. L. Geiß, J. Klingen, K. B. Schröder, K. Bernhard, *Klebstoffe, Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren*, Wiley-VCH, Weinheim, 2005.
- 13) a) S. T. Murphy, C. Zou, J. B. Miers, R. M. Ballew, D. D. Dlott, G. B. Schuster, *J. Phys. Chem.* 1993, 97, 13152; b) N. A. Koska, S. R. Wilson, G. B. Schuster, *J. Am. Chem. Soc.* 1993, 115, 11628; c) G. B. Schuster, *Pure Appl. Chem.* 1990, 62, 1565.
- 14) H.-J. Timpe, B. Strehmel, *Makromol. Chem.* 1992, 192, 779.
- 15) S. E. Knudsen, *KMT, Modern Journal of Ancient Egypt*, 2001, 12, 36.
- 16) T. Brömme, J. Moebius, S. Schäfer, C. Schmitz, B. Strehmel, *Europ. Coat. J.* 2012, 9, 20.
- 17) U. Ernst, *NIR-Trocknung von Offsetfarbschichten mit skalierbaren Diodenlasern*, BMBF-Förderverbund Trockodil, FKZ 13N 10011.
- 18) B. Strehmel, V. Strehmel, *Two-Photon Physical Organic, and Polymer Chemistry: Theory, Techniques, Chromophore Design, and Applications*, in *Advances in Photochemistry* [Hrsg.: D. C. Neckers, W. S. Jenks, T. Wolff], 2007, 29, 111, Wiley, New York.

Bernd Strehmel ist seit dem Jahr 2011 Professor für Lackchemie und Neue Materialien an der Hochschule Niederrhein in Krefeld. Er studierte Chemie an der TH Merseburg und promovierte dort; anschließend hatte er verschiedene Forschungsaufenthalte sowohl im Ausland an der Stanford University und dem Center for Photochemical Sciences (Bowling Green State University) als auch in Deutschland an der TU Berlin, der Universität Potsdam und der HU Berlin; nach der Habilitation in physikalischer Chemie im Jahr 2003 wechselte er in die Abteilung Forschung und Entwicklung der Kodak, wo er Fragen der Photopolymerisation in Kombination mit Diodenlasern und lithografischen Druckplattenbearbeitete. Seine Forschungsschwerpunkte sind: NIR-Photopolymere, ultraschnelle Photopolymere für LED-Anwendungen, neue Monomere und Bindemittel, Modifizierung von Lackrohstoffen. bernd.strehmel@hsnr.de




Die Welt ist voll von Halbwissen.

Häufig hören sich Dinge vorteilhafter an, als sie bei näherer Betrachtung wirklich sind. Besonders im sensiblen beruflichen Umfeld der Chemie ist Halbwissen fehl am Platz. Deshalb arbeiten wir seit 1947 mit Leidenschaft und Akribie daran, dass evaluierte Daten und Fakten rund um das Themenfeld Chemie zur Verfügung stehen. Immer. Und ohne Ausnahme. So wurde „Der RÖMPP“ Synonym für inzwischen über 60 000 Stichwörter und über 200 000 Querverweise, auf die man sich verlassen kann. Das sollten Sie sich am besten selbst anschauen.

Nur 100% sind 100%.
www.roempp.com

Sonderpreis
für GDCh-Mitglieder **139,- €**
für stud. Mitglieder **69,- €**

www.gdch.de

GDCh

125 Jahre
Thieme