

Einsatz von hochtransparenten Flüssigsilikonem in Kraftfahrzeugscheinwerfern

<i>Marc Kaup</i>	<i>L-LAB</i>	<i>phone: +49(0)2941/38-31267</i>
	<i>Rixbecker Straße 75</i>	<i>fax: +49(0)2941/38-31267</i>
	<i>59552 Lippstadt</i>	<i>mail: marc.kaup@l-lab</i>

1 Einleitung

Dynamische Lichtverteilungen, die sich adaptiv und vollautomatisch auf unterschiedliche Fahrsituationen und Lichtverhältnisse einstellen, sind heute bereits Stand der Technik. Einen Weg zur Realisierung variabler Scheinwerferlichtverteilungen stellt beispielhaft ein Projektionsmodul mit einer rotierbaren Walze dar. Diese Walze besitzt auf ihrer Mantelfläche unterschiedliche Konturen. Sie befindet sich im Strahlengang zwischen Lichtquelle und Linse des Moduls und bedient sich so des Prinzips der subtraktiven Lichtverteilungserzeugung. Im Gegensatz zur subtraktiven Erzeugung bieten LED-Matrix-Scheinwerfer die Möglichkeit unterschiedliche Lichtverteilungen additiv zu verwirklichen.

Die Entwicklung, Verwendung und Steuerung von variablen Linsen als Sekundäroptik würde die bestehenden Konzepte ergänzen. Um die Dissipation von sichtbarer Strahlung und auch den Bauraum zu minimieren, bietet es sich an, eine einzige Linse so zu verformen, dass eine Lichtverteilung dadurch variabel wird und beispielsweise Funktionen eines adaptiven Frontbeleuchtungssystems (AFS) [ECE07] realisiert werden könnten.

Wie dieser Beitrag belegen soll, eröffnet die LED als Lichtquelle in diesem Zusammenhang nicht nur Freiheiten hinsichtlich der Lichtfunktionen und des neuartigen Erscheinungsbildes eines Scheinwerfers. Sie verlangt u.a. aufgrund ihrer Abstrahlcharakteristik ebenfalls nach dem Einsatz „neuer“ Materialien und Konzepte. Als beständig gegen hohe Temperaturen, energiereiche sichtbare oder ultraviolette Strahlung, bei gleichzeitig hervorragenden Transmissionseigenschaften, erweisen sich hochtransparente Flüssigsilikone, kurz LSR (Liquid silicone rubber). Als sammelnde Optikvorstufe, in unmittelbarem Kontakt zu „weißen“ Hochleistungs-LEDs, als (flexible) Auskoppeloptik oder in Form von Lichtlei-

tern ergeben sich potenzielle Einsatzmöglichkeiten. Gegenüber dem Werkstoff Glas bieten transparente Silikone zudem fertigungstechnische Vorteile, insbesondere im Hinblick auf eine industrielle Massenproduktion.

2 Werkstoff LSR – Verarbeitung, Struktur, Eigenschaften

Siloxane nehmen hinsichtlich ihrer chemischen Struktur eine Zwischenstellung zwischen typisch organischen und typisch anorganischen Verbindungen ein. Sie unterscheiden sich von den organischen Polymeren dadurch, dass die Hauptkette nicht durch Kohlenstoffverbindungen aufgebaut ist, sondern aus alternierenden Silizium- und Sauerstoffatomen besteht. Durch den Einbau von organischen Seitengruppen – im einfachsten Fall Methylgruppen – erhält man Produkte mit besonderen Eigenschaften. Abbildung 1 veranschaulicht die Struktur eines Polysiloxans im Allgemeinen.

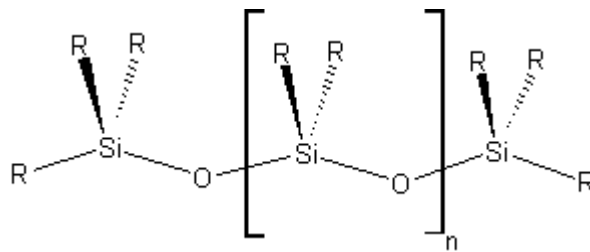


Abbildung 1: Allgemeine Strukturformel Polysiloxan

Ein Siloxan-Elastomer, auch als Silikonkautschuk bezeichnet, entsteht durch eine weitmaschige Vernetzung der Polysiloxane. Diese Vernetzungen sind letztendlich der Grund für das typische elastische Verhalten und die teilweise hohen reversiblen Verformungen von Elastomerbauteilen. Heißvernetzende Flüssigsilikonkautschuke (LSR) sind nicht zuletzt aufgrund ihrer Verarbeitung darüber hinaus ein besonderes Material. LSR-Typen vernetzen über eine platinkatalysierte Additionsreaktion. Die Reaktion läuft bei Raumtemperatur langsam, bei Erhöhung der Temperatur sehr rasch ab. Vorteilhaft sind, im Hinblick auf Serienanwendungen, daraus resultierend kurze Vulkanisationszeiten und ein verbessertes Entformungsverhalten. Des Weiteren besteht der Vorteil der Additionsvernetzung darin, dass keine flüchtigen Spaltprodukte frei werden [Dom08], [RS06].

Silikonkautschuke sind im Allgemeinen hochpolymere, vernetzte Siloxane, die sich besonders durch hohe thermische und UV-Beständigkeit, gute Kälteflexibilität, gute dielektrische Eigenschaften, sehr hohen Widerstand gegen den Angriff von Sauerstoff und Ozon sowie durch geringe Temperaturabhängigkeit der technologischen Eigenschaften auszeichnen

[Dom08]. Dabei sind die mechanischen Eigenschaften, wie Härte und Module, u.a. durch die Vernetzungsdichte einstellbar. Insbesondere LSR findet in der Automobilindustrie i.d.R. für Dichtelemente, Membranen, Schläuche etc. den Anwendungsbereich, den man für Elastomere erwartet. Hochtransparentes LSR weckt aktuell das Interesse von Leuchtmittel-, Leuchten- und Scheinwerferherstellern, da nicht zuletzt der Transmissionsgrad den von etablierten thermoplastischen Kunststoffen sogar übersteigen kann. Die Lichtdurchlässigkeit bleibt auch unter hoher Beanspruchung erhalten. Probleme der Vergilbung bis hin zur Zerstörung des Werkstoffs sind aufgrund der Beständigkeit des Silikonkautschuks, hinsichtlich der zu erwartenden elektromagnetischen Strahlungen und Temperaturen innerhalb eines Kfz-Scheinwerfers, als unkritisch anzusehen. Die Begründung ist hier maßgeblich in der hohen Bindungsenergie des Si-O-Rückgrats der Silikone zu suchen ($451 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), die um fast 30 % höher ist als die des C-C-Gerüsts entsprechender amorpher Thermoplaste (PC, PMMA u.ä.) [Bay10].

Aufgrund des charakteristischen Vernetzungsmechanismus lassen sich auch dickwandige, optische Bauteile spannungsfrei im Spritzgussverfahren herstellen, ohne dabei eine lange Nachdruckzeit, ein überdimensioniertes Angussystem oder einen geringen Temperaturgradienten im Werkzeug berücksichtigen zu müssen, wie es der „klassische“ Thermoplastspritzguss eines Polycarbonats (PC) oder Acrylglasses (PMMA) erfordern würde [Bay10]. Diese Spannungsfreiheit ist gleichbedeutend mit einer optischen und mechanischen Isotropie, die nicht nur die Handhabung eines LSR-Bauteils im Rahmen von Simulationen erleichtert.

Die hohe Abformgenauigkeit und kalkulierbare Flexibilität des Silikons innerhalb des Verarbeitungsprozesses erlaubt zudem die Gestaltung von komplizierten Oberflächen ohne Einfallstellen, den Verzicht auf Ausformschrägen und ermöglicht zugleich die Entformung von Hinterschnitten.

3 Anwendung (I): Sammelnde Primäroptiken

Die Effizienz eines Kraftfahrzeugscheinwerfers lässt sich durch den Leuchtenwirkungsgrad beschreiben, also durch das Verhältnis des vom Scheinwerfer emittierten Lichtstroms zum Lichtstrom der Lichtquellen. Allein um diese Effizienz zu steigern, erweist es sich als sinnvoll, den emittierten LED-Lichtstrom „einzusammeln“ und dabei die Zahl an optischen

Grenzflächen minimal zu halten. So kann eine sogenannte Primäroptik also als Kollimator, in unmittelbarem Kontakt zur Halbleiterlichtquelle fungieren.

Das Prinzip eines LED-Matrix-Scheinwerfers geht einen Schritt weiter. Um den Lichtstrom jedes einzelnen LED-Chips nicht nur dazu zu nutzen, das Vorfeld eines Kraftfahrzeugs statisch auszuleuchten, sondern Scheinwerferlichtfunktionen, wie blendfreies Fern-, Markierungs- oder Kurvenlicht zu realisieren, muss das Licht in diskrete Raumwinkel abgestrahlt werden. Primäroptiken in der unmittelbaren Umgebung der leuchtenden Flächen sind somit unverzichtbar, um in einer engen Matrixstruktur die Lambert-Charakteristik der einzelnen Leuchtdioden außer Kraft zu setzen und diese Struktur auch innerhalb der Lichtverteilung zu nutzen. Die Beständigkeit des LSR gegenüber der zum Teil energiereichen Strahlung einer phosphorkonvertierten, blauen Leuchtdiode prädestiniert dieses Material geradezu. Die Kombination aus erhöhter Temperatur und energiereicher Strahlung stellt Thermoplasthersteller und –verarbeiter derzeit vor eine schwierige Aufgabe aufgrund von einsetzenden Materialschädigungen und verlangt nach Lösungen [Krä10].

4 Anwendung (II): Abbildende Sekundäroptiken

Eine refraktive Sekundäroptik erfüllt innerhalb eines Projektionssystems im Kraftfahrzeugscheinwerfer die Aufgabe, den aus der Optikvorstufe austretenden Lichtstrom im Vorfeld des Fahrzeugs so zu verteilen, dass trotz Einhaltung aller Regelungen eine optimale Ausleuchtung des Verkehrsraums möglich ist. LUCE ET AL. belegten bereits anhand eines praktischen Versuchs, dass LSR-Optiken aufgrund ihrer thermischen Stabilität sogar in Halogen- oder Gasentladungsmodulen eine Applikation finden könnten [LSZ09]. Dabei wurde jedoch nur die ausbleibende Degradation (Vergilbung) in einem Lebensdauertest belegt. Wie sich unterschiedliche Temperaturen auf die optischen Abbildungseigenschaften auswirken und wie diesen eventuell zu begegnen ist, gilt es zu klären. Festzuhalten bleibt, dass sich der Brechungsindex des Silikons verhältnismäßig stark mit steigender Temperatur reduziert (ca. $-0,0003 \text{ K}^{-1}$).

Über eine Materials substitution von Glas und thermoplastischen Polymeren als derzeitige Materialien der Wahl hinaus kann die Flexibilität des Elastomers genutzt werden, um optische Eigenschaften einer Sekundäroptik im Scheinwerfer mechanisch zu beeinflussen. Als natürliches Vorbild dient die Linse innerhalb des menschlichen Auges, die aufgehängt an Fasern, über einen Ringmuskel ihre Brennweite verändert. Ein vergleichbares

Aktorsystem könnte in diesem Zusammenhang zur Realisierung eines akkommodierenden Scheinwerfers beitragen. Als sinnvoll im Hinblick auf eine automobiler Anwendung würde sich – speziell im Falle einer rotationssymmetrischen Linse – die Aufbringung von Druckverformungskraften mittels Ringaktoren erweisen. RÜCKERT bedient sich im Rahmen eines Systems mit höchsten Ansprüchen an die Form der optischen Flächen eines Fluidringaktors [Rüc09]. Dieses und ähnliche Prinzipien gilt es zu untersuchen.

Mit Hilfe der Methode der finiten Elemente ist es dabei im Vorfeld möglich, die Verformung eines Bauteils anhand von Materialparametern und vorgegebenen Kräften zu prognostizieren. Parallel dazu erfolgt die optische Auslegung anhand diskreter Verformungszustände, um Funktionen eines adaptiven Frontbeleuchtungssystems (AFS) zu simulieren. Mechanische und optische Simulation bilden somit einen iterativen Prozess, wie Abbildung 2 andeutet.

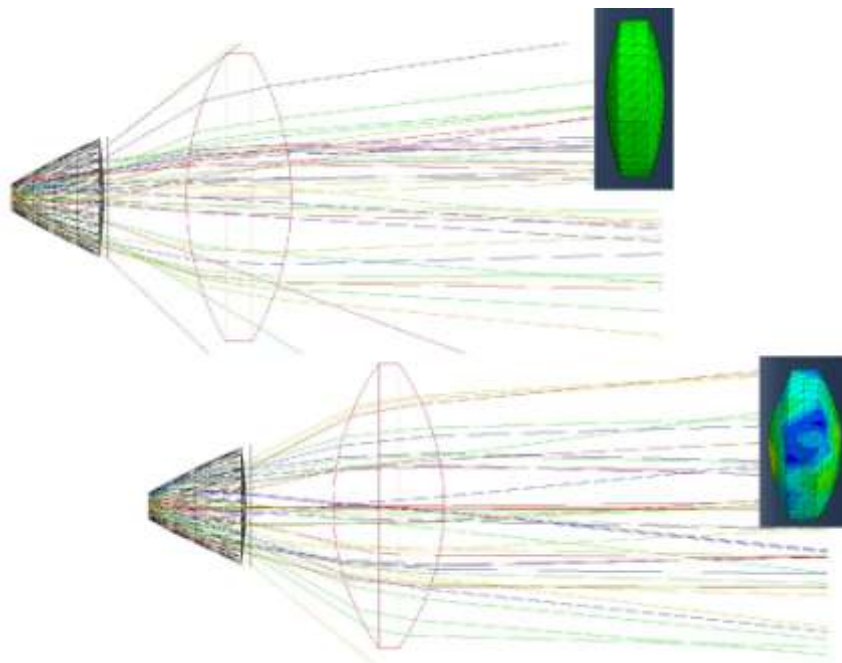


Abbildung 2: Auslegung einer variablen Scheinwerferlichtfunktion [ZEMAX, ABAQUS]

Ein weiteres Ziel ist, Linsen in Abhängigkeit der thermischen Ausdehnung und des gleichzeitig sinkenden Brechungsindex so zu konstruieren, dass beide Effekte sich zumindest teilweise kompensieren. Auch eine Reaktion des Aktors auf die thermisch bedingten Änderungen ist durchaus denkbar.

Die eingangs erwähnte geringe Abhängigkeit der technologischen Eigenschaften, explizit des Elastizitätsmoduls, von der Temperatur soll die mechanische Auslegung eines derartigen Systems vereinfachen. SCHNEIDER ET AL. ermittelten zusätzlich für ein transparentes

Polydimethylsiloxan-Elastomer, dass bis zu Verformungen von 40 % hinreichend genau mit einem linearen Spannungs-Dehnungsverhalten (Hooke'sche Gerade) gerechnet werden darf [SFW+08]. Kautschuktypisches, nichtlineares Verhalten könnte unter Umständen vernachlässigt werden, wenn die Verformungen genügend klein bleiben. Neben den anzunehmenden isotropen Werkstoffeigenschaften und der Inkompressibilität des Elastomers (Querkontraktionszahl $\nu \approx 0,5$) vereinfacht sich das Modell für die FEM-Simulation dadurch weiter.

5 Zusammenfassung

Hochtransparente Flüssigsilikone stellen durchaus mehr als nur einen Substituenten für Gläser oder transparente Thermoplaste dar. Vereinfacht gesagt: überall dort, wo u.a. Beständigkeit gegen energiereiche Strahlung und Temperaturextreme gefordert ist, sind transparente Flüssigsilikone als Werkstoff für optische Anwendungen mit ins Kalkül zu ziehen – also auch im Kraftfahrzeugscheinwerfer. Sich die Elastizität des Materials in Entformungs-, Füge-, Verformungsprozessen oder als dämpfendes Element zu Nutze zu machen, liegt ebenfalls nahe.

Literatur

- [Bay10] Bayerl, H.: *Ultraschalltransparente Flüssigsilikone – ein neuer Werkstoff für optische Technologien*. Beitrag zur VDI-Konferenz Technologien in der Fahrzeugtechnik, Karlsruhe, April 2010
- [Dom08] Domininghaus, H.: *Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen*. 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2008
- [ECE07] Economic Commission for Europe: *Einheitliche Bedingung für die Genehmigung von adaptiven Frontbeleuchtungssystemen*. ECE-Regelung Nr. 123, Tag des Inkrafttretens 02.02.2007
- [Krä10] Kräuter, G.: *Kunststoffe in der LED-Technologie – Herausforderungen und Trends*. Beitrag zur SKZ-Fachtagung Kunststofftechnologien in der Fahrzeugbeleuchtung, Würzburg, November 2010

- [LSZ09] Luce, T.; Schalle, E.; Ziegler, N.: *The Advent of Polymer Projector Headlamp Lenses*. Beitrag zur ISAL, Darmstadt, 2009
- [Rüc09] Rückert, W.: *Beitrag zur Entwicklung einer elastischen Linse variabler Brennweite für den Einsatz in einem künstlichen Akkomodationssystem*. Universitätsverlag Karlsruhe, 2009
- [RS06] Röthemeyer, F.; Sommer, F.: *Kautschuk Technologie – Werkstoffe, Verarbeitung, Produkte*. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [SFW+08] Schneider, F.; Fellner, T.; Wilde, J.; Wallrabe, U.: *Mechanical properties of silicones for MEMS*. Journal of Micromechanics and Microengineering, 18(6):065008 (9pp), 2008.