

# Effizientes Licht

**Multiphysikalische Simulationen helfen, Kosten und Energieverbrauch bei Hochdruck-Entladungslampen zu verringern.**

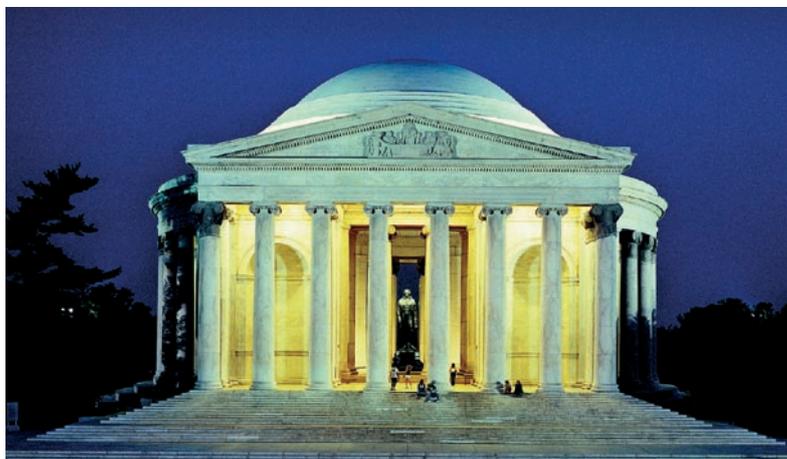
Thomas D. Dreeben und Lars Fromme

**D**en Energieverbrauch zu reduzieren, ist eine der zentralen Aufgaben des 21. Jahrhunderts. Neben treibstoffeffizienten Fahrzeugen, Niedrigenergiebauweise bei Gebäuden und stromeffizienten elektrischen Geräten ist das Energieeinsparpotenzial in der Beleuchtungstechnik hoch. Weltweit wird der Energieverbrauch für Beleuchtung auf ungefähr 2800 TWh pro Jahr geschätzt, das sind 20 Prozent der global genutzten elektrischen Energie. Bei einer sehr konservativen Kostenabschätzung von 10 Cent pro kWh betragen die Energiekosten dafür 280 Milliarden Dollar pro Jahr. Jede Effizienzsteigerung bei den Leuchtmitteln, die sich global durchsetzen kann, ermöglicht also immense Energie- und Kosteneinsparungen. Neben den LEDs sind die sog. Hochdruck- oder High-Intensity-Discharge-Lampen (HID) eine vielversprechende Alternative für die Beleuchtung.

## Hochdruck-Entladungslampen

Bei einer HID-Lampe liegt eine Wechselspannung zwischen zwei Elektroden und erzeugt einen Entladungsbogen durch ein Gas, das in einer hermetisch versiegelten Bogenentladungsröhre aus Quarz oder Keramik eingeschlossen ist (Abb. 1). Im Betrieb strahlt der Lichtbogen, der typischerweise Temperaturen von 5000 bis 6000 K erreicht, den größten Anteil des Lichts ab. HID-Lampen werden oft für die Beleuchtung von weiten Arealen verwendet, sowohl innerhalb von Gebäuden als auch im Freien, wo sie entsprechende Vorteile bei der Raum- und Energieeffizienz bieten.

Durch die systematische Modulation der Spannungsversorgung der Lampe werden darin Schallwellen erzeugt, die an den Wänden des



Das Jefferson Memorial in Washington wird mit energieeffizienten HID-Lampen

von OSRAM Sylvania beleuchtet.

Entladungsgefäßes reflektiert werden und bei resonanter Anregung dazu führen, dass sich stehende Schallwellen ausbilden. Diese wechselwirken mit dem Lichtbogen und verformen ihn. Dies kann grundsätzlich zwar zu unerwünschten Effekten führen [1], aber auch – bei geeigneter Anpassung der Akustik – zu einer Steigerung der Lampeneffizienz um 50 Prozent [2]. Eine solche Verbesserung entspricht allein für den amerikanischen Markt einer Energieersparnis von rund 50 TWh pro Jahr – soviel Energie wurde 2008 in den USA durch Windenergie erzeugt.

## Simulation in der Beleuchtung

Simulationen werden intensiv genutzt, um den Energieverbrauch bei Lampen zu reduzieren. Im ingenieurwissenschaftlichen

Umfeld dienen sie häufig als Maßnahme zur Zeit- und Kosteneinsparung. Da sie vergleichbare Informationen liefern wie experimentelle Versuche, eignen sich Simulationsmodelle dafür, die Anzahl der benötigten Prototypen zu reduzieren. In einem Forschungsumfeld wie bei OSRAM soll die Simulation vor allem helfen, das Verständnis der vorliegenden physikalischen Phänomene zu erweitern. Simulation und Experiment ergänzen sich hierbei: Experimente zeigen wichtige Aspekte des Problems, die die Simulationsmodelle nicht hergeben, und mit Simulationsmodellen lassen sich Einflussfaktoren berücksichtigen, die das Experiment nicht liefern kann. An den Stellen, an denen sich die Informationen der beiden Methoden überlappen, sind Vergleiche möglich, um Glaubwürdigkeit aufzubauen und zu klären, wo die Grenzen der Simulationsanwendung liegen. Da OSRAM die Simulationsmodelle oft nutzt, um Informationen zu erhalten, die das Experiment nur indirekt liefert, ist es essenziell, dass die Simulation die Physik richtig und präzise abbildet.

OSRAM verwendet die Simulationssoftware COMSOL Multiphy-



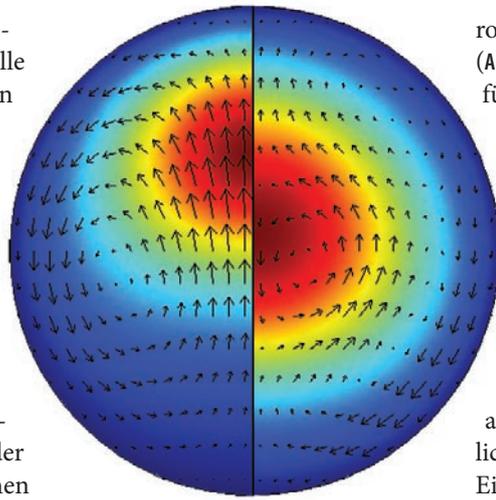
Abb. 1 Eine HID-Lampe mit einer Leistung von 175 Watt. Die Entladungsröhre enthält Quecksilberdampf.

Thomas D. Dreeben, OSRAM Sylvania, 100 Endicott Street Danvers, MA 01923 USA; Dr. Lars Fromme, COMSOL Multiphysics GmbH, Berliner Straße 4, 37073 Göttingen

sics in erster Linie wegen der Flexibilität, die das System bietet. Alle zu lösenden Gleichungen wurden selbst definiert und dabei verschiedenste Koeffizienten parametrisiert. Dies verlangt eine erhebliche mathematische Freiheit, wesentlich mehr als die „user-defined“-Funktionen bieten, die die meisten Softwarepakete anbieten. Die Möglichkeit, in COMSOLs PDE-Modus eigene partielle Differentialgleichungen sowohl in der klassischen als auch der schwachen Form definieren zu können, in Kombination mit der Skriptsteuerung durch das MATLAB-Interface, gibt OSRAM die nötige Flexibilität, um die Modellierung in neue Forschungsbereiche auszudehnen.

### Anwendung der Simulation

Bei der Simulation der Akustik und ihrer Auswirkungen auf die Leistung einer HID-Lampe gilt es, die physikalischen Eigenschaften auf zwei separaten Zeitskalen zu berücksichtigen [3]. Auf der kleineren Zeitskala, mit Schritten von  $10^{-5}$  Sekunden, wird durch den kompressiblen, un stetigen Durchfluss die unmittelbare Schallwellenausbreitung simuliert. Auf der größeren Zeitskala, mit Schritten von  $10^{-2}$  Sekunden, werden die Strömungsflüsse aufgelöst, wobei sich die Strömung auf den zeitlich mit der kleineren Zeitskala gemittelten Durchsatz bezieht [4]. Dieser Durchfluss resultiert aus den konvektiven Bedingungen der zugrundeliegenden Gleichungen und ist verantwortlich für sämtliche



akustischen Effekte in der HID-Lampe. Um die vollständigen physikalischen Eigenschaften beider Zeitskalen zu erfassen, enthält das Modell Gleichungen, welche die Masse, den Impuls in zwei oder drei Dimensionen, die Energie und den elektrischen Strom erhalten – alles in einer vollständig gekoppelten, kompressiblen und instationären Formulierung.

### Streckung des Lichtbogens

Eine der Schlüsselfunktionen der Akustik ist die Streckung des gekrümmten Lichtbogens in einer HID-Lampe. Die Krümmung tritt in einer horizontal ausgeführten Lampe dort auf, wo hohe Temperatur- und Dichtegradienten zwischen dem Lichtbogen und der Umwandlung existieren und Auftriebskräfte dafür sorgen, dass der Lichtbogen zur oberen Wand verschoben wird. In der Simulation ist die Lichtbogenkrümmung zu sehen sowie die akustische Begradigung im Querschnitt des Entladungs-

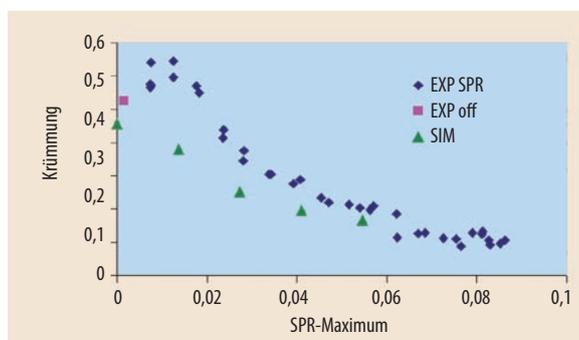
rohres, senkrecht zum Lichtbogen (Abb. 2). Die Simulationsergebnisse für die vertikale Position des Lichtbogens lassen sich mit den experimentellen Ergebnissen vergleichen (Abb. 3).

Der Vorteil der Modellierung besteht darin, dass sie detaillierte Informationen über die Struktur der Schallwellen liefert, die zur Lichtbogenstreckung führen. Die Streckung tritt als Ergebnis zweier unterschiedlicher Druckmoden auf, der zweiten Eigenschwingung in azimuthaler Richtung und der ersten in radialer Richtung (Abb. 4).

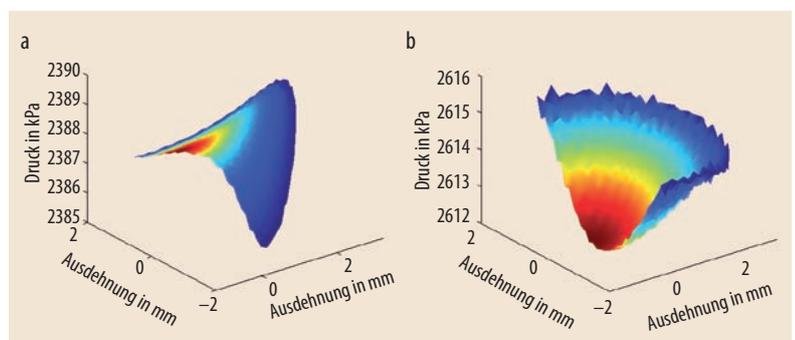
Die akustische Anregung ermöglicht es, die Effizienz der HID-Lampe enorm zu verbessern. Mit der Simulation lassen sich die wichtigen Aspekte der akustischen Verbesserung in HID-Lampen abschätzen und visualisieren. Dadurch ist es möglich, ein besseres Verständnis aufzubauen, Effekte vorherzusagen und diese zu kontrollieren. Die Simulation ist an dieser Stelle unverzichtbar, da sich viele der Schlüsselmechanismen außerhalb der Reichweite der experimentellen Messtechnik befinden.

◀ **Abb. 2** Vergleich eines gekrümmten (links) mit einem akustisch gestreckten Lichtbogen (rechts). Die Temperatur wächst von 1500 K (dunkelblau) bis auf 6000 K (dunkelrot) im Lichtbogen. Die Vektoren repräsentieren die Strömungsgeschwindigkeit.

- [1] R. Schafer und H. P. Stormberg, J. Appl. Phys. 53, 3476 (1982)
- [2] K. Stockwald, H. Kaestle und H. Weiss, ICOPS 2008: Proceedings of 35th IEEE International Conference on Plasma Science (2008)
- [3] J. Olsen und T. D. Dreeben, IEEE Transactions, eingereicht
- [4] Lord Rayleigh, Transactions of the Royal Society of London, 175 (1883)



**Abb. 3** Lichtbogenkrümmung über Spectral Power Ratio (SPR), eine Messung der Amplitude der akustischen Anregung. Die Krümmung ist mit dem inneren Radius des Entladungsrohres normiert.



**Abb. 4** Druckmoden, die für die Streckung des Lichtbogens benötigt werden. Die zweite azimuthale Eigenschwingung (a) verursacht einen Strömungsfluss, der den Lichtbogen aus seiner

gekrümmten Form abflacht. Die erste radiale Eigenschwingung (b) verursacht einen Strömungsfluss, der den Lichtbogen im Zentrum hält. Die Temperatur ist wie in Abb. 2 kodiert.