

## Weltweit erster **Voll-LED-Scheinwerfer im Audi R8**

Im Audi R8 tritt der weltweit erste Vertreter einer neuen Generation von Automobilscheinwerfern auf, bei denen ausschließlich Licht emittierende Dioden (LED) als Lichtquelle eingesetzt werden. Automotive Lighting und Audi haben bei Design, Technik, Integration und behördlicher Zulassung echte Pionierleistungen erbracht. LED sind auch im Kraftfahrzeug wegen ihres niedrigen Energieverbrauchs, ihrer langen Lebensdauer und der einfachen elektronischen Modulation die Lichtquelle der Zukunft.

## 1 Einleitung

Der Einsatz von LED im Frontscheinwerfer begann mit Signalleuchten, also ersten Hybrid-Modellen im Jahr 2004. Davor dominierte ein Jahrhundert lang die Glühlampe alle Funktionen und seit den späten achtziger Jahren die Gasentladungslampe, auch Xenonlampe genannt, die Funktionen Abblend- und Fernlicht.

LED-Lichtquellen unterscheiden sich in ihren Eigenschaften grundlegend von Glühlampen mit Wolframfäden oder Xenon-Lampen mit einem Plasma als Lichtquelle. Nach dem Anlegen einer Flussspannung emittiert die LED Licht aus dem Halbleitermaterial. Die Lichtfarbe wird durch den Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband bestimmt. Gelb entsteht direkt in der LED mit Aluminium-Indium-Galliumphosphid (AlInGaP). Der effektivste Weg, aus einer LED weißes Licht für Scheinwerferanwendungen zu generieren, ist die Phosphorkonversion: Eine blau emittierende Diode aus Indium-Gallium-Nitrid (InGaN) erzeugt in Verbindung mit dem aufgebrachtene Phosphor eine Mischung aus blau und gelb, also weißes Licht.

## 2 LED und neue Gestaltungsmöglichkeiten

Der Automobilherstellerwunsch nach einem unverwechselbaren Fahrzeug- und Nachterscheinungsbild wird durch die positiven Eigenschaften der kleinen Halbleiter-Lichtquellen unterstützt. Halbleiter erfahren keinen mechanischen Verschleiß; im Ergebnis steht eine nahezu unbegrenzte Lebensdauer im Vergleich zu der des Automobils. Dies wiederum eröffnet neue Möglichkeiten bei der Gestaltung des Frontbereichs des Fahrzeugs und des Motorraums, da Service- und Wartungszugänge zum Beispiel zum Glühlampentausch nicht mehr erforderlich sind.

Neue Technologien können nur dann erfolgreich eingeführt werden, wenn sie am Markt akzeptiert werden. LED machen das Erscheinungsbild des Fahrzeugs attraktiv und verleihen ihm Wiedererkennungswert. Automotive Lighting

und Audi ist es gemeinsam gelungen, ein technisches Konzept zu entwickeln, das dem R8 mittels Voll-LED-Technologie ein interessantes, neuartiges Erscheinungsbild verleiht. **Bild 1.**

## 3 Leistung und Energieverbrauch der Fahrzeugbeleuchtung

### 3.1 Anschlussleistung

Ein bisher unbeachtetes Potenzial findet sich mit LED auch in der installierten Anschlussleistung. Die Lichtschaltmodule des Fahrzeugherstellers müssen eine nicht unerhebliche Leistung bereitstellen. Insbesondere in konventionellen Fahrzeugen können die geforderten Stromstärken bis zu 50 A erreichen. Dies erfordert hohe Investitionen in die Leistungsfähigkeit der Bauelemente der einzelnen Lichtschaltmodule. **Tabelle 1** gibt eine Übersicht über die durchschnittlichen Anschlussleistungen und die daraus resultierende maximale Anschlussleistung, für die ein Steuergerät ausgelegt werden muss. Wie in Tabelle 1 ersichtlich ist, könnte eine LED zirka 480 W, das sind zirka 36 A bei 13,2 V einsparen. Dies entspricht einer Verminderung des maximalen Leistungsabruhs eines Bordnetzsteuergeräts von zirka 75 %.



**Bild 1:** LED eröffnen neue Möglichkeiten, das Fahrzeug- und Markenimage zu transportieren

**Tabelle 1:** Untersuchung der maximalen Anschlussleistung der elektrischen Verbraucher der Fahrzeugaußenbeleuchtung: die Anschlussleistung kann je nach Fahrzeugtyp schwanken; Einflussfaktoren sind Glühlampentyp, Design, Bestromung, Anzahl der LED

Funktion	Anschlussleistung Watt pro Fahrzeug bei 13,2 V	Anschlussleistung Watt pro Fahrzeug bei 13,2 V
	konventionell	LED 2012
Abblendlicht	136	66
Fernlicht	136	40
Tagfahrlicht	50	14
Begrenzungsleuchte	14	2
Blinkleuchte vorne	50	10
Seitenmarkierungsleuchte	14	2
Seitenmarkierungsleuchte	14	2
Blinkleuchte hinten	50	10
Kennzeichenleuchte	24	2
Rückfahrleuchte	50	4
3. Bremsleuchte	50	4
Bremsleuchte	50	10
Schlussleuchte	14	2
Summe	652	168
Differenz	Δ = 484 W (74,3%)	

Nicht nur die Steuergeräte müssen derartige Leistungen beherrschen, auch der Generator muss für die Halogensysteme sehr leistungsfähig ausgelegt werden. Durch einen Wirkungsgrad von  $\eta < 0,7$  wegen Verlusten im Kupfer und bei der Ummagnetisierung sind die Einsparpotenziale auch beim Generator nicht unerheblich.

### 3.2 Nutzungsdauer der Fahrzeuglichttechnik

Unabhängig von den Installationsaufwendungen werden die Lichtfunktionen allerdings mit stark unterschiedlichen Einschalt Dauern genutzt. Ergebnisse aus der Literatur [1] wurden mit den vorliegenden Daten aus den Häusern der beiden Autoren verglichen. Auf dieser Basis ist eine durchschnittliche Nutzungsdauer pro gefahrenem Kilometer erstellt worden.

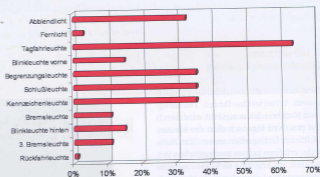
Eine Aussage über den statistischen mittleren Energieverbrauch pro gefahrenem Kilometer lässt sich aus der angenommenen Leistung aus Tabelle 1 gewichtet mit der durchschnittlichen Nutzungsdauer aus Bild 2 ermitteln. Die Anga-

ben sind mit der Bezeichnung „Index“ versehen, um auszudrücken, dass es sich um die statistische Bewertung eines gefahrenen Kilometers handelt, der zum Beispiel zu 33 % aus Nachtfahrt und zu 67 % aus Tagfahrt besteht.

Die Auswertung der Daten in Tabelle 2 zeigt, dass ein Fahrzeug mit konventioneller Technik einen durchschnittlichen Verbrauch von 130 W pro Index-Kilometer hat. Ein Fahrzeug hingegen, das vollständig mit LED ausgerüstet ist, hat einen durchschnittlichen Verbrauch von lediglich 38 W/km und spart somit 92 W/km. Das sind umgerechnet 2,4 g/km CO<sub>2</sub> oder zirka 70 % weniger Primärenergiekosten für durchschnittliche Fahrzeuge und Geschwindigkeit. Dies ist für das Gesamtfahrzeug ein geringer Anteil, aber unter Berücksichtigung der Ersparnis in der Bordnetzelektronik ein diskussionswürdiger Beitrag.

### 3.3 LED-Wirkungsgrad

Ein für den Erstbeobachter diffuses Bild stellen die Zukunftsperspektiven dar, die in verschiedenen Veröffentlichungen zu finden sind. LED sind in diesem Punkt



**Bild 2:** Relative Nutzungsdauer der Außenbeleuchtung pro durchschnittlich gefahrenem Kilometer

**Tabelle 2:** Auswertung des Verbrauchs der Lichtfunktionen unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer der Funktionen und der abgegebenen Leistung (Angabe pro Index-Kilometer)

	per Index	per Index
	konventionell	LED 2012
Leistung	130 W	38 W
CO <sub>2</sub> -Ausstoß	3,4 g/km	1 g/km
Differenz	Δ = 2,4 g CO <sub>2</sub> /km	

nicht mit konventionellen Lichtquellen vergleichbar. Die Wirkungsgrade sind stark abhängig von der Umgebungstemperatur beziehungsweise der durch die Größe des Chips begrenzten Stromstärke und Erwärmung. Innerhalb der einzelnen LED treten noch Unterschiede durch die Herstellung beziehungsweise den eingesetzten Betriebsstrom auf. So kann sich je nach Anwendungsfall ein Unterschied von einem Faktor zwei oder mehr in der Wirkungsgradbetrachtung ergeben, **Bild 3**. Gesichert ist jedoch die weitere Erhöhung der Wirkungsgrade, was die LED-Technologie auch in Zukunft interessant machen wird.

## 4 Tagfahrlicht

### 4.1 Verkehrssicherheit und Kosten-Nutzen-Verhältnis

In vielen Ländern ist das Fahren mit eingeschaltetem Fahrlicht auch tagsüber obligatorisch (zum Beispiel in Skandinavien, in der Tschechischen Republik, auf Landstraßen in Italien und Ungarn). Alternativ kann auch eine separate Signalleuchte mit der Funktion Tagfahrlicht (Daytime Running Lamp; DRL) nach Regelung 87 der Wirtschaftskommission für Europa (Economic Commission for Europe; ECE) eingesetzt werden.

Mehr als 40 Studien wurden bislang zu den Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit veröffentlicht. Einige Studien weisen nach, dass die verpflichtende Einführung von DRL zwischen 5 % und 15 % der schweren Unfälle und bis zu 40 % der Mehrparteienunfälle reduzieren kann.

Einer der relevanten Nachteile in Bezug auf die Einführung von Tagfahrlicht ist der Anstieg des Energieverbrauchs und damit der Emission von  $\text{CO}_2$ . Eine Studie [2] der Europäischen Union berechnet Gesamtkosten von 17 bis 30 Millionen Euro durch Schadstoffemission, Primärenergiekosten und Glühlampenersatz. Im Gegensatz dazu sollen die Unfallkosten um zirka 40 bis 50 Millionen Euro reduziert werden. Eine Anwendung von LED würde das Kosten-Nutzen-Verhältnis also deutlich verbessern.

Neben den rein ökonomischen Argumenten für Tagfahrlicht mit LED ermöglicht es die neue Technologie, dem Fahrzeug eine deutliche stilistische Unter-

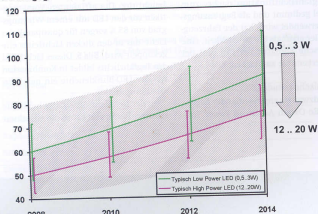
scheidungsmöglichkeit zu geben. Wenn die Tagfahrlichtfunktion nachts zum Beispiel gedimmt und als Begrenzungslicht verwendet wird, hat der Fahrzeughersteller erstmals die Möglichkeit, eine spezifische Signatur bei Tag und bei Nacht erkennbar zu machen, **Bild 4**.

### 4.2 Optische Lösung DRL

Vierundzwanzig eng beieinander liegende weiße Osram Advanced Power Top-

LED sorgen für eine gleichmäßige Ausleuchtung. Die effizienten Vorsatzoptiken vor den LED mit einem Wirkungsgrad von 85 % sorgen für quasiparalleles Licht, das in den dicken Lichtleiter eingekoppelt wird, **Bild 5**. Dieses Lichtband des Tagfahrlichts bildet in Kombination mit der LED-Blinkleuchte ein neues Erscheinungsbild.

In der Detailauflösung, das heißt aus kürzerer Entfernung sind die einzelnen

Wirkungsgrad  $\eta$  / (lm/W)

**Bild 3:** Wirkungsgrad – Roadmap in Abhängigkeit der Leistungsklassen und Toleranzen



**Bild 4:** Tagfahrlicht als Designelement

LED und die Kissenoptiken zu erkennen. Insgesamt 216 Lichtpunkte entstehen so für den Beobachter. Bei zunehmender Beobachtungsentfernung verschmelzen die Lichtpunkte immer mehr und eine lönnförmige Funktion entsteht. Bei Nacht wird der sogenannte Wing zusammen mit Abblendlicht betrieben und leuchtet als Begrenzungslicht mit reduzierter Lichtleistung.

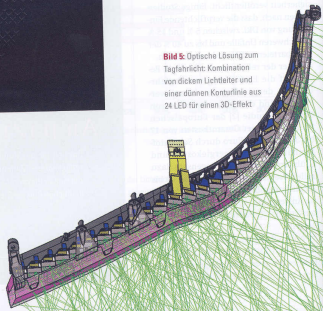
## 5 Optische Lösungen der Hauptlichtfunktionen

Alle optischen Lösungen mussten den Randbedingungen folgen, die aus einem bestehenden Scheinwerfer und damit der vorbestimmten Größe und Peripherie bestanden. Sie mussten deshalb nicht nur anders aussehen, sondern auch in den vorgegebenen Bauraum passen.

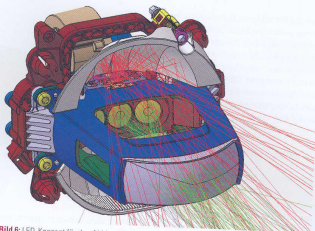
Wie bei konventionellen Lichtquellen können zwei technische Lösungen verwendet werden: Projektionssysteme, die eine intern erzeugte Lichtverteilung auf die Straße projizieren, oder Reflexionsysteme, die Abbilder der Lichtquelle direkt auf der Straße erzeugen. Mit dem technischen Ansatz im R8 konnten beide Systeme verwendet werden, die sich einen gemeinsamen Kühlkörper und Träger teilen. Im R8 findet man oben und unten Reflexionssysteme und in der Mitte ein Linsensystem, **Bild 6**. Verwendet werden Lumileds Automotive Front Lighting Source (LAFLS), die neuen Hochleistungs-komplexlichtquellen der Firma Philips Lumileds.

Eine weitere innovative Herausforderung bildet die Tatsache, dass drei individuelle Elemente eine gemeinsame Lichtverteilung erzeugen sollen. Dies bedeutet einen zusätzlichen Justagevorgang bei der Fertigung des Abblendlichtmoduls.

**Bild 5:** Optische Lösung zum Tagfahrlicht: Kombination von dickem Lichtleiter und einer dünnen Konturlinie aus 24 LED für einen 3D-Effekt



Zwei Teile sind vergleichbar mit einem Nebelscheinwerfer mit je einer breiten symmetrischen Lichtverteilung und werden durch die Reflexionssysteme, Bild 6, bedient. Die Ausdehnung beträgt zirka  $40^\circ$  und das Maximum erreicht etwa 10 lux. Der dritte Teil ist eine schmale spotartige Lichtverteilung mit zirka  $10^\circ$  Ausbreitung und einem Maximum von Ausbreitung und einem Maximum von Ausbreitung rund 40 lux und wird durch das Linsensystem erzeugt, Bild 7. Die aktuelle Lichtverteilung wird mit 44 W elektrischer Leistung erzeugt. Während der Montage Einzelteile werden die drei Hell-Dunkel-Grenzen überprüft und aneinander angepasst, so dass die Fertigungszelle ein komplett justiertes Modul verlässt.



**Bild 6:** LED-Konzept für das Abblendlicht, bestehend aus drei Elementen: zwei Reflektoren und einer Linse

## 6 Thermische Lösungen

### 6.1 Thermischer Widerstand

LED geben im Gegensatz zu Halogen- oder Gasentladungslampen sogenanntes kaltes Licht ab, aber nur zirka 20 % der eingespeisten Energie wird in sichtbares Licht umgewandelt. Bei Glühlampen sind es 4 %; der Rest wird als Wärme an die Umwelt abgegeben. Lichtstrom, Farbe und Betriebsspannung sind temperaturabhängig. Die maximal zulässige Chiptemperatur beträgt zurzeit je nach Hersteller und Typ zirka  $125^\circ\text{C}$  bis  $185^\circ\text{C}$ . Wird diese Temperatur überschritten, wird die LED zerstört.

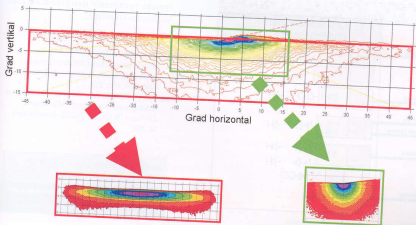
Der Chip ist der heißeste Teil im System. Der thermische Widerstand zwischen Chip und LED-Gehäuse liegt bei Hochleistungs-LED zwischen 2 K/W und

4 K/W. Weiterer thermischer Widerstand besteht zur Platine, zum Kühlkörper und der Wärmeableitung an die umgebende Luft. Zwischen all diesen Komponenten summiert sich der thermische Gesamtwiderstand des Systems. Trotz des kalten LED-Lichts fallen also erhebliche Wärmebeiträge an. Diese müssen unter Berücksichtigung des thermischen Widerstands sehr effektiv von der LED wegtransportiert werden. Ein Gesamtsystem mit 7 K/W würde mit einer 15 W-LED also eine Temperaturerhöhung von  $105^\circ\text{C}$  erzeugen, mit dem Effekt, dass manche LED bereits bei Raumtemperatur zerstört wür-

den. Die Entwicklung von Kühlkörpern mit kontrolliertem Luftweg und Antrieb durch automotiv-qualifizierte Lüfter trägt der Anforderung nach geringstem thermischem Widerstand Rechnung.

### 6.2 Enttaugung durch systematische Luftführung

Ein weiteres Phänomen kann durch den LED-Scheinwerfer abgemildert werden: Durch die Erwärmung im Scheinwerfer dehnt sich die Luft aus; kühlt der Scheinwerfer nach dem Abschalten ab, wird hingegen wieder Luft eingesaugt. Bei großer Luftfeuchtigkeit kann Wasserdampf in-



**Bild 7:** Darstellung der grundsätzlichen Aufteilung des Lichts auf der Straße – die Reflexionssysteme aus Bild 6 erzeugen die links unten dargestellte Lichtverteilung, der Spot die rechts dargestellte Lichtverteilung

nen auf der Abdeckscheibe kondensieren. Diese natürliche Ursache führt zwar zu keiner technischen Beeinträchtigung, ist aber visuell leicht zu entdecken und führt zu Kundenverunsicherung. Die kontrollierte Führung der LED-Abluft erlaubt ein schnelles Enttauen des Niederschlags und gleichzeitig eine gute Kühlung durch die große Abdeckscheibe, Bild 8.

## 7 Fahrzeug-Elektronik-Integration

Die Integration eines Dioden-Scheinwerfers in ein Auto ist Pionierarbeit. Die Karosserie Light Control Unit (LCU) erwartet noch immer eine besondere elektrische Antwort einer Lampe auf die Diagnoseanfrage. Die notwendigen LED-Treiber simulieren mehr oder weniger die elektrische Eigenschaft einer Glühlampe. In einem Voll-LED-Scheinwerfer werden die Lichtfunktionen vollständig von elektrischen Steuergeräten versorgt, die auch die Lüfter regeln.

Alternative Konzepte wie eine passive Kühlung oder Wärmeröhre, sogenannte Heat Pipes, könnten die Lüfter ersetzen. Aber das resultierende höhere Gewicht von bis zu 1,6 kg sind für ein modernes Fahrzeug nicht zu tolerieren. Daher werden die Lüfter auch in den nächsten Generationen ihren Einsatz finden.

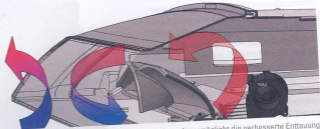
Die Lichtfunktionen werden von dem Bordnetz via Local Interconnect Network (LIN), Controller Area Network (CAN) oder zum Beispiel durch ein pulsweitengesteuertes (Puls Width Modulation;

PWM) Vorschaltgerät angesteuert, Bild 9. In modernen Steuergeräten wird über PWM die Überspannung abgefangen, um die Glühlampen vor Spannungsspitzen über 13,5 V zu schützen. Daher könnte ein PWM-Signal auch für die LED-Funktionen verwendet werden. Unter den Gesichtspunkten der elektromagnetischen Verträglichkeit sind hohe gepulste Ströme starke Emittoren und daher werden separate PWM-Kanäle bevorzugt. Variationen in der Fahrzeugspannung werden durch die LED-Ansteuerung ausgeregelt. Gleichzeitig kann die abgegebene Leistung auch mit der LED-Temperatur abgeglichen werden. Die Temperatur wird durch Sensoren direkt auf den LED-Komplexlichtquellen ermittelt. In extremen Temperaturbedingungen kann die LED-Leistungsaufnahme so angepasst werden, dass die Zerstörung der LED vermie-

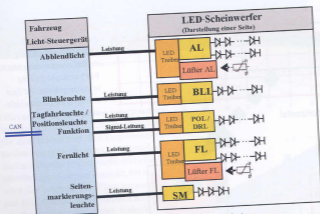
den wird. Mit einer Auslegung auf 120 % bis 130 % der Normalanforderungen entsteht Sicherheit, um auf die Temperaturschwankungen zu reagieren.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Scheinwerfer treffen Technik aus der Intention der Verkehrssicherheit und Design unmittelbar aufeinander. Bereits heute hat der Gesamtscheinwerfer eine sehr viel geringere Leistungsaufnahme als ein konventionelles Halogensystem. 2012 könnten bis zu 70 % Energie und CO<sub>2</sub> eingespart werden wenn alle Funktionen mit LED bestückt werden, und das bei gleichbleibender Lichtqualität. Bei 6,3\*10<sup>11</sup> km, die pro Jahr in Europa gefahren werden, liegt das allein durch diese Lichttechnik erzeugte jährliche Einsparpotenzial bei 5,8\*10<sup>8</sup> l. Die LED-Technologie steht erst am Anfang und verspricht spannende designerische und technische Lösungen.



**Bild 8:** Die systematische Luftführung im Scheinwerfer ermöglicht die verbesserte Enttäuung und gleichzeitige Wärmeabfuhr über die große Fläche der frontseitigen Abdeckscheibe



**Bild 9:** Prinzipalschaltbild des LED-Steuergeräts und Anschlusstopologie