

LED Know-how

Stephan Link

Inhaltsverzeichnis

Vorwort an meine Leser	i
0.1. Vorwort zur 2. Auflage	i
0.2. Vorwort zur 1. Auflage	iii
Einführung	v
1. Grundsätzliches zur LED	1
1.1. Begrifflichkeiten und Symbole	1
1.2. MYTHEN um die LED	2
1.3. Der Beleuchtungsmarkt und die LED	5
1.3.1. Angebotsseite des LED (-Chip) Marktes:	5
1.3.2. Nachfrageseite des LED-Marktes:	7
2. Geschichte der LED	11
3. Wie funktioniert eine LED?	13
3.1. Funktionsweisen traditioneller Lampen im Vergleich	13
3.2. Das optoelektronische Wirkungsprinzip der LED	16
3.2.1. Einschub: Elektrische Leitfähigkeit	17
3.2.2. Quantenmechanisches Bandmodell	20
3.2.3. Dotierung	23
3.2.4. Elektrisches Verhalten des Halbleiters / der LED	23
3.3. Die „buntfarbig“ lumineszierende Diode	25
3.4. Wie kommt weißes Licht aus der blauen Diode?	28
4. Herstellung der blauen GaN-LED:	31
4.1. Herstellung des Saphir-Wafers	31
4.1.1. Züchtung des Saphirkristalls	33
4.1.2. Formung des Wafers	37
4.2. Epitaxie des Saphir-Wafers mit GaN	40

Inhaltsverzeichnis

4.3. Metallisierung / p-Kontaktierung	45
4.4. Strukturätzen	45
4.5. Vereinzeln der LEDs	45
4.6. Verbau der LED (Packaging)	46
4.7. Aus Blau und Gelb mach weiß: Die Rolle des Phosphors	47
4.7.1. Entwicklung der Phosphore / Luminophore	51
4.7.2. Kontakt-Phosphor	53
4.7.3. Remote-Phosphor	54
4.8. Lichteigenschaften, Lichtwerte und Bedeutung	54
4.8.1. Licht als relative Erscheinung, als Empfindung	55
4.8.2. Spektralbereich	56
4.8.2.1. Angabe der Wellenlänge für bunte LEDs	56
4.8.2.2. Farbtemperaturbestimmung bei weißen LEDs	58
4.8.2.3. Farbtreue: Der Color-Rendering-Index der LED	59
4.8.3. Einschub: photo- und radiometrische Größen u. deren Messung	60
4.8.3.1. Photometrische Größen	61
4.8.3.2. Radiometrische Größen	62
4.8.3.3. Messgeräte	62
4.9. Messen und Binning der LED	66
4.9.1. Einmessen der LED	67
4.9.2. Binning-Kriterien	68
4.9.3. Weitere Herstellerangaben	68
4.9.4. LED Verpacken	68
5. LED-Optiken	72
5.1. Einschub: Opto-physikalische Eigenschaften des Lichts	73
5.1.1. Licht als Quantenobjekt: Teilchen und Welle	74
5.1.2. Interferenz bei Lichtwellen	75
5.1.3. Beugung von Lichtwellen	76
5.1.4. Reflexion, Transmission und Lichtbrechung	78
5.2. Für LEDs optimierte Optiken	80
5.2.1. LED-Primäroptiken	82
5.2.2. Sekundäroptiken	83
5.2.3. Tertiäre Optiken	86
6. Wärmemanagement bei der LED-Beleuchtung	88
6.1. Optimale Temperaturen für LEDs	89
6.2. Einschub: Grundlagen bei Wärmeübertragung	91
6.2.1. Wärmetransport durch Wärmeleitung (Konduktion)	91
6.2.2. Wärmetransport durch Konvektion	93

6.2.3. Wärmeübertragung durch (Temperatur-) Strahlung	93
6.3. Wärmeübertragung bei der LED	94
6.4. Primäres Wärmemanagement bei der LED	94
6.5. Heatsink-Design	98
6.6. Aktive vs. Passive Kühlung und thermisches Leuchtendesign . . .	103
6.7. Intelligentes Heat-Management	104
6.7.1. Hitze-Regelung mit einem „Voltage-Output Temperature Sensor“	105
6.7.2. Hitze-Regelung mit einem „Mixed-Signal Controller“ . . .	105
6.7.3. Regelung mit Farbsensoren	105
7. Betreiben und Ansteuern der LED	106
7.1. Einschub: Elektrotechnische Grundlagen	107
7.1.1. Spannung (U)	107
7.1.2. Stromstärke (I)	109
7.1.3. Der elektrische Widerstand (R)	110
7.1.3.1. Widerstand unter Gleichstrom-Bedingungen . . .	110
7.1.3.2. Ohm'scher Widerstand	110
7.1.4. Der Skin-Effekt	111
7.1.5. Die elektrische Leistung (W)	114
7.1.6. Serien- bzw. Reihenschaltung	114
7.1.7. Parallelschaltung	116
7.2. Die LED bei Batteriebetrieb	117
7.2.1. Einschub: Versuch mit einfacher LED-Schaltung	117
7.2.2. Vor- und Nachteile beim Batteriebetrieb	119
7.3. Betrieb mit Wechselstrom	121
7.3.1. Einschub: Charakteristik von Wechselstrom	121
7.3.2. LED-Betrieb an Netzspannung	123
7.3.3. LED-Betrieb mit Kleinspannungs-Trafos	126
7.4. LED-Betrieb mit Gleichstrom	131
7.4.1. Blindleistungs-Problematik	133
7.4.1.1. Einschub: Woher kommt die Blindleistung? . . .	133
7.4.1.2. Maßnahmen gegen Blindleistung	136
7.4.2. Betrieb mit Konstantspannung-LED-Konvertern	137
7.4.3. Betrieb mit Konstantstrom-Konvertern	139
7.5. LEDs ansteuern	141
7.5.1. Dimmen auf der Primärseite	142
7.5.1.1. Phasenanschnitt-Dimmung	142
7.5.1.2. Phasenabschnitt-Dimmung	144
7.5.2. Dimmen auf der Sekundärseite mit PWM	147

Inhaltsverzeichnis

7.5.3.	Lichtmanagement: Steuerprotokolle und Bedienung	150
7.5.3.1.	1-10V/0-10V Steuerung	150
7.5.3.2.	Taster-Steuerung (PUSH)	151
7.5.3.3.	Funkfernsteuerung	152
7.5.3.4.	Digitale DALI-Schnittstelle	154
7.5.3.5.	Digitales DMX-512-Protokoll	155
7.5.3.6.	Der KNX-Standard	156
7.5.3.7.	ZigBee und andere WiFi-Protokolle	158
7.5.3.8.	Welches Protokoll für welche Aufgabe?	159
7.6.	Flackern/Flickern: Ursachen u. Maßnahmen	160
7.7.	Summen und Pfeifen	161
8.	LED-Lampen und -Leuchten	163
8.1.	LED-Produkt-Qualität	163
8.1.1.	Technik versus Preis und Anspruch	163
8.1.2.	Das Phänomen Shenzhen	165
8.1.3.	CE-Konformität	169
8.1.4.	Prüfsiegel von Prüforganisationen	169
8.1.5.	Weitere Produkterfordernisse	170
8.2.	Retrofits nach Lichtcharakteristik u. Sockeltyp	172
8.2.1.	LED-Birnen (Bulbs) E27/E14	173
8.2.1.1.	Problem Lampengeometrie	173
8.2.1.2.	Glühfaden-Imitate	175
8.2.1.3.	Sonderform Maiskolben	176
8.2.1.4.	Resüme: LED-Bulbs	176
8.2.2.	LED-Spots	177
8.2.2.1.	LED-Spots MR16/GX5.3 u. MR11/GX5.3	177
8.2.2.2.	MR16/GU10-Retrofits	182
8.2.2.3.	PAR-Strahler (E27)	183
8.2.2.4.	12V-AR111/G53	184
8.2.2.5.	ES111/GU10	184
8.2.3.	GX 53	184
8.2.4.	Halogenersatz G4/G9-Sockel	185
8.2.5.	G23, G24dx bzw. G24qx	187
8.2.6.	LED-Röhren (Tubes)	188
8.2.6.1.	T8/G13, T12/G13 Tubes	191
8.2.6.2.	T5 (T16)/G5 Tubes	192
8.2.7.	Sofitten-Lampen	193
8.2.8.	Bauart-bedingte Grenzen bei Retrofits (Leuchtrichtung, Wärme)	194
8.3.	LED-optimiertes Leuchtendesign	196

8.3.1.	Langfeldleuchten (linear luminaires)	196
8.3.1.1.	Vouten-Beleuchtung (Cove-Lighting)	197
8.3.1.2.	Langfeldleuchten im Interior-Bereich	199
8.3.1.3.	LED-Strip als Basis für Linear- und Akzentbeleuchtung	201
8.3.2.	Panel-Leuchten für Wand u. Decke	205
8.3.3.	Backlight-Module	206
8.3.3.1.	Backlight-Panels	206
8.3.3.2.	Flexible Back-LEDs	207
8.3.4.	Einbauleuchten für Decke u. Wand	208
8.3.4.1.	Deckenstrahler / Downlights	208
8.3.4.2.	Glasfaser-Beleuchtung	210
8.3.4.3.	Wand-Einbau - Flur- und Treppenbeleuchtung	211
8.3.4.4.	Bodeneinbauleuchten für den Außenbereich	212
8.4.	Aufbauleuchten für Wand, Decke und Boden	213
8.4.1.	Aufbauleuchten für direktes Licht	213
8.4.2.	Wandleuchten für indirektes Licht	214
8.4.3.	Echte Wallwasher	215
8.5.	Schienen-Strahler	215
8.6.	Flutlichtstrahler und Straßenbeleuchtung	217
8.7.	High Bay und Low Bay für Hallenbeleuchtung	219
8.8.	Lichtband-Systemleuchten	219
9.	LEDs für besondere Anwendungen	222
9.1.	LEDs in Displays der Unterhaltungsgeräte und Telekommunikationsindustrie	222
9.2.	Große LED-Displays für Werbung und Information	222
9.3.	Kfz-Beleuchtung	223
9.4.	Beleuchtung im Transportbereich etc.	224
10.	Die Zukunft der LED	225
10.1.	Trends in der Allgemeinbeleuchtung	226
10.2.	Was unterscheidet OLED und LED?	229
A.	Meine eigene LED-Story	231
B.	Urheberrecht	234
C.	Impressum	235

Vorwort an meine Leser

0.1. Vorwort zur 2. Auflage

Der Inhalt der ersten Auflage entstand während eines Sommerurlaubes 2013 im wunderschönen Urlaubsort Marina di Ascea im Cilento/Campania in Italien. Mittlerweile, zu Beginn 2016, sind fast 3 Jahre vergangen, in denen sich gezeigt hat, wie sich Beleuchtungsmarkt und LED-Technik weiter entwickelt haben. Bis auf wenige Ausnahmen gab es auf technischer Seite wenig Neues und am Markt relativ wenige unerwartete Überraschungen... Dennoch finde ich, dass es Zeit ist für ein kleines Update, das sich in einigen Anmerkungen, Änderungen und Ergänzungen auf das Buch auswirkt, ohne dass damit gleich das Buch in größerem Stil neu geschrieben werden müsste...

Eine aktuelle Zwischenbilanz für Anfang 2016: Die LED hat sich als Industriestandard für Beleuchtung jetzt voll etabliert, gleichwohl der Endverbraucher noch nicht ganz auf den Zug aufgesprungen ist und mangels technischen Verständnisses weiterhin ziemlich verunsichert bleibt. Die Leuchten-Industrie hat sich zunächst ja auch relativ schwer getan, Produktion und Geschäftskonzept schnell auf die LED-Technologie umzustellen, inzwischen aber durch den Aufbau eigenes Know-hows oder den Zukauf professioneller Komponenten die Sache technisch doch im Griff. Hat man die seltene Gelegenheit, ganz offen mit Herstellern zu sprechen, wird klar, dass gegenüber der alten, konventionellen Technologie branchenweit die Margen durch den erhöhten technischen Aufwand und kurzen Produktzyklus stark unter Druck geraten sind. Vor allem kleine Hersteller haben es schwer, nötige Gewinnmargen einzufahren, da die Konkurrenz aus Asien mit ihren günstigen Fertigungskosten, vertreten im Internet, Möbelhandel und Baumarktbereich enorm ist. In jüngster Zeit kommt den etablierten Leuchtenherstellern wenigstens die Tatsache zu Gute, dass die Einkaufspreise für die LEDs selbst, oder fertige LED-Engines und Netzgeräte dank einem relativen Überangebot am Markt stark fallen. Besonders ganz große Hersteller im Beleuchtungssektor haben inzwischen ihre frühere Vormachtstellung verloren. Drastisch ist der Wandel gerade im Leuchtmittelbereich, der von der

Vorwort an meine Leser

Großindustrie bis vor kurzem dominiert wurde. Das LED-Leuchtmittel wird mit jedem Monat immer noch günstiger und der Endkunde orientiert sich bei seiner Kaufentscheidung zuvorderst am Preis, den er sicher noch nach wie vor mit den alten Preisen für konventionelle Leuchtmittel vergleicht. Qualitative Merkmale als Grund für eine Kaufentscheidung sind für ihn trotz EU-einheitlicher Deklaration nach wie vor eigentlich unsichtbar und nicht verständlich. Spätestens seit die großen Discounter wie ALDI, LIDL, etc. oder auch IKEA in 2015 mit Kampfpreisen und eigens für sie produzierten und gelabelten Produkten ins LED-Lampen Retrofit-Geschäft eingestiegen sind, können auch etablierte Platzhirsche wie z.B. Philips oder Osram damit kaum noch vernünftige Absatzmengen geschweige denn Gewinne erzielen. Gleiches gilt für die asiatischen Technologie-Riesen wie z.B. Samsung oder Toshiba. Rückzug oder Verkauf sind die logische Folge. Im gewerblichen bzw. architektonischen Beleuchtungsbereich hatte es die LED bis vor kurzem und teilweise noch jetzt relativ schwer, sich gegen konventionelle Leuchten mit Leuchtstoff-Technologie durchzusetzen. Vor allem deshalb, weil diese quasi im Abverkauf mit Kampfpreisen angeboten werden, die regelmäßig höchstens die Hälfte der LED-Version betragen. Günstige LED-Leuchten mit niedriger Qualität sind wegen zahlreicher Ausfälle in diesem Sektor aber inzwischen kaum noch nachgefragt. Alle Preise für LED-Leuchten fallen stark, dafür sorgen die Mitbewerber und nicht zuletzt der Elektro- und Leuchten-Großhandel, der nach wenigen Jahren der eigenen Ohnmacht dank seiner hohen Marktmacht die Hersteller wieder mit seinen Wünschen und Vorgaben zurück ins Boot geholt hat um diesen wichtigen Distributions-Markt nicht zu verlieren. D.h. die neuesten LED-Leuchten sind zur Freude vieler Elektroinstallateure wieder mehr Plug and Play und weniger erklärungsbedürftig bzw. kompliziert in Einbau und Ansteuerung.

0.2. Vorwort zur 1. Auflage

Im Juni 2014: Dieses Info-Buch habe ich mit Freude für alle geschrieben, die mit LEDs zu tun haben und sich näher dafür interessieren. Ganz besonders spreche ich all jene an, die sich mit Design, Planung, Herstellung, Verkauf oder Installation von Beleuchtung beschäftigen und sich gerne ein noch tieferes Verständnis für die LED-Technologie und ihre vielseitigen Anwendung wünschen. Dazu will ich z.B. die Wirkungsweise der LED so verständlich erklären, dass man die Hintergründe und Zusammenhänge auch ohne Studium der Physik oder Ingenieurskunst versteht. Zusätzlich stelle ich jedem Leser meine spezielle Berufserfahrung im LED-Anwendungsbereich zur Verfügung. Jeder Interessierte soll von diesem Buch für seine Arbeit profitieren können.

LEDs sind im Vergleich zur Glühlampe, hoch-technische, optoelektronische Produkte, die aufgrund der rasanten Entwicklungsgeschwindigkeit der Hochtechnologie auch den neuesten Stand der Technik widerspiegeln. Auch als Nicht-Techniker empfiehlt es sich, einen Blick auf die zugrunde liegende Physik zu werfen, will man begreifen, wie das Licht in der kleinen LED entsteht und was günstig oder ungünstig für den LED-Betrieb ist.

Folgende technisch-physikalische Themengebiete habe ich in den LED - relevanten Teilgebieten aufgegriffen, da sie für das Verstehen der LED-Wirkungsweise von besonderem Interesse sind:

- Elektronik (Lehre von der Steuerung der Elektronen): Wirkungsweise u. Ansteuern der LED
- Optik (Lehre von der Ausbreitung des Lichts): Farbe und Ausbreitung des Lichts
- Thermodynamik (Wärmelehre): Leuchten-Design, Qualität, Effizienz, Lebensdauer der LED

Aber bitte haben Sie keine Angst vor zu viel oder komplizierter Physik! Ich versuche stets, die technischen Hintergründe bildlich und vom Prinzip her leicht verständlich darzustellen und verzichte weitgehend auf Mathematik. Für die Lektüre dieses Buches wird grundsätzlich keinerlei spezielle Vorbildung vorausgesetzt. Zum besseren Verständnis des Geschriebenen sind jeweils zahlreiche Abbildungen eingefügt. Sicher wird jeder Leser eigene, individuelle Interessen besitzen und daher für sich selbst unterschiedliche Schwerpunkte setzen. Wem die teilweise durchaus vertiefenden Ausführungen dann vom Thema her doch zu speziell sein sollten, oder wem das teilweise nichts Neues ist, der kann diese ja ggf. „quer lesen“ oder ganz überspringen.

Vorwort an meine Leser

An späterer Stelle wird er dann schon bemerken, ob er mit seinem Verständnis immer noch am Ball ist, oder vielleicht doch etwas zurückblättern sollte... Mir selbst hilft es fast immer, einen Sachverhalt ein zweites Mal zu lesen, wenn ich feststelle, dass ich anscheinend etwas doch nicht in der Gänze verstanden habe.

Trotz meines Bemühens um umfangreiche und korrekte Informationen, erhebe ich für dieses Buch natürlich keinerlei wissenschaftlichen Anspruch. Alle konstruktiven Verbesserungsvorschläge sind mir immer gerne willkommen.

Jetzt wünsche ich jedem Leser noch viel Spaß beim Lesen!

Einführung

Die LED, ein echter Quantensprung in der Festkörperbeleuchtung:

Die LED ist inzwischen schon fast jedem ein Begriff. Sie hinterleuchtet im Verborgenen unsere Bildschirme, macht sich in der Automobilbeleuchtung breit und hat in die Allgemeinbeleuchtung einen triumphalen Einzug gehalten. Der Erfolg dieser Technologie beruht hauptsächlich auf ihrer Strom sparenden Eigenschaft. Bei uns im Westen kämpft die LED als Ablöse-Technologie immer erfolgreicher gegen die historisch eigentlich noch recht junge Kompaktleuchtstoffröhre und gegen die ältere Halogenlampe mit ihrem schönen, weichen Licht. Sie setzt sich immer mehr gegen viele teilweise noch tief sitzende Vorbehalte bei Lichtplanern und Privatleuten durch, es gibt eigentlich kein Vorbeikommen mehr am Thema LED. In der Beleuchtungsindustrie wurde inzwischen die anfänglich gezeigte Zurückhaltung aufgegeben, alle potentiellen Möglichkeiten der LED auszunützen.

Früher war jede Leuchte im Prinzip ein aufgehübschtes Behältnis für das rundum abstrahlende Leuchtmittel, die eigentliche Lampe bzw. Lichtquelle. Die Leuchte musste stets so konzipiert sein, dass die begrenzt lebensfähige Lampe für den regelmäßigen Austausch leicht für den Endverbraucher zugänglich war. Mit der LED ist dieser Designansatz jetzt eigentlich völlig hinfällig. Bei richtiger technischer Konzeption muss die LED gar nicht mehr ausgetauscht werden, da sie unter günstigen Bedingungen ein langes Leben von 50 Tausend Betriebsstunden und mehr erreichen kann, ohne einen bemerkenswerten Verlust ihrer Leuchtkraft zu erleiden. I.d.R. wird die Lebensdauer einer Leuchte nicht von der LED, sondern von elektronischen Bauteilen limitiert.

Die einzelne LED strahlt ihr Licht aufgrund ihrer flachen Bauweise nicht rund, sondern nur halbrund ab. Deshalb ergeben sich Vor- und Nachteile beim Leuchtdesign, die die Grundformen unserer konventionellen Leuchten sicherlich bald entsprechend verändern wird. Auch wenn es wahrscheinlich ein paar weitere Jahre dauern wird, bis dies in den Köpfen von Leuchten-Designern und Verbrauchern vollständig angekommen ist, befinden wir uns schon mitten in einer Umbruchzeit mit sichtbaren Veränderungen. Ich will zum Vergleich eine Analogie bringen: Die

Einführung

ersten Autos sahen zu Beginn auch noch wie Pferdekutschen ohne Pferde aus, bevor sie ein eigenständiges, konsequent auf den Pferde-losen Antrieb optimiertes Auto-Design verpasst bekamen...

In der Zwischenzeit werden als Ersatz für die EU-weit ausgemusterte Glühbirne, Halogenlampe oder Leuchtstoffwendel, die Retrofits (= LED - Leuchtmittlersatz) eingesetzt, damit man die alte Leuchte noch weiterverwenden kann. Wegen der anfangs relativ viel höheren Preise im Vergleich zur Glühbirne oder Halogenlampe, fehlender Aufklärung und zunächst teilweise noch ungenügender Leistung und Farbqualität, wurden die Retrofits erst sehr zaghaft und unsicher vom Kunden angenommen. Ende 2015 stiegen dann aber die Discounter massiv mit LED-Leuchtmittel-Aktionen in den Markt für Endverbraucher ein und haben einen Preiskampf eingeläutet, in dem die Preise innerhalb kürzester Zeit halbiert wurden. Natürlich wird hier viel fragliche Qualität angeboten, die Sorge vor Reklamationen dürfte sich aber mit geringerem Preis entsprechend proportional minimieren.

Etwas differenziert sieht die Situation in China aus, wo die Regierung genau wie bei uns die EU auch mit Glühbirnen- Verkaufsverboten nachgeholfen hat. Trotz des insgesamt noch relativ geringeren Lebensstandards zu uns wird vor allem wegen des immensen Baubooms und damit Neubedarfs an Innen- und Außenbeleuchtung gleich auf LED-Beleuchtung gesetzt. Entsprechend hoch sind die Stückzahlen chinesischer Produkte auch für den Inlandsmarkt. Chinesische Unternehmen bedienen mit großen Mengen an Leuchten und Leuchtmitteln auch unseren europäischen Beleuchtungsmarkt, als Billig-Lieferant für den Handel bzw. Auftragsfertiger für unsere europäischen Leuchtenhersteller. Nach neuester Entwicklung übernehmen sie sogar europäische Hersteller. China ist schon seit einigen Jahren größter Leuchtenproduzent und wird dies wohl für lange bleiben.

Die jüngste ansteigende Verwendung von LEDs im Automobilbau und in den von Hochtechnologie getriebenen Industrien der Informations- und Unterhaltungselektronik befeuern die technische Weiterentwicklung der LED weiterhin und die Herstellungskosten sinken mit den verkauften Stückzahlen. Die treibenden Kräfte für den rasanten technologischen Fortschritt sind, neben den Bemühungen um Effizienz- und Qualitätsverbesserungen, hauptsächlich die von Handel und Verbraucher erzwungene Kostenoptimierung. Die EU treibt durch ihre Energiespar-Richtlinien und Qualitätsanforderungen die LED-Entwicklung indirekt dadurch mit an, dass sie teilweise mindere Qualität vom Markt verbannt und bessere Kennzeichnung einfordert. Diese Regulierung bringt auch dem EU-Hersteller Wettbewerbsvorteile zurück, die Markteintrittsschwelle für Produkte aus China wird etwas erhöht. Keiner kann heute sicher vorhersagen, mit welcher Technik die Beleuchtung von

morgen realisiert wird. Eine Vorhersage mache ich aber schon: Mit den vielen neuen Möglichkeiten der Lichterzeugung wird das alte Paradigma „Wegwerf-Leuchtmittel in schön-praktischem Gehäuse“ bald mehrheitlich der Vergangenheit angehören, da es keinen Grund mehr gibt, ein tauschbares Leuchtmittel einzusetzen. Hoffentlich wird der Stellenwert der Beleuchtung gleichzeitig steigen.

Kapitel 1

Grundsätzliches zur LED

1.1. Begrifflichkeiten und Symbole

Spricht man LED wie Led als Worteinheit aus oder betont man jeden Buchstaben einzeln? Einfach Geschmackssache! Ich bevorzuge die letztgenannte Version, wegen des besseren Klangs und der Tatsache, dass die Buchstaben L E D abkürzend für „Light Emitting Diode“, zu deutsch: Licht Emittierende Diode, stehen. Seltener wird die LED auch noch Lumineszenz-Diode genannt. Lumineszenz ist die Aussendung von kaltem Licht. „Emittieren“ ist ein Fremdwort basierend auf dem lateinischen Verb „emittere“, was bei den Römern soviel wie entsenden, ausschicken oder abziehen lassen bedeutete, heutzutage in der Physik fachbegrifflich für „ausstrahlen“ und in der Finanzwelt für „in Umlauf bringen“ verwendet wird. Diode ist die Bezeichnung für ein elektronisches Bauelement, dass den Strom, ab einer bestimmten angelegten Spannung, nur in eine (Durchlass-) Richtung fließen lässt. Heutzutage meint man mit Diode fast immer die Halbleiterdiode mit ihrem typischen p-n-Übergang, da Röhrendioden, wie sie in den ersten Radios und Fernsehern verbaut waren für Alltagsgeräte Geschichte sind.

Als LED wird umgangssprachlich oft auch der verbaute LED-Chip (engl.: die) bezeichnet, also die zum Lötten/Bonden fertige Halbleiterdiode mitsamt ihrem Gehäuse und Leitung. Fälschlicherweise auch die ganze Lampe, z.B. ein Retrofit. Die unpräzise Benennung hat sicher auch damit zu tun, dass die LED selbst relativ winzig sein kann und früher hauptsächlich in der gekapselten 2-Pin-Version auf dem Markt war. Auch der Begriff Lampe (z.B. LED-Lampe) wird ungenau gehandhabt, er steht in der Umgangssprache sowohl für das eigentliche Leuchtmittel, als auch für die gesamte Leuchte, obwohl die Lampe streng genommen eigentlich nur die Lichtquelle in einer Leuchte ist. Das Symbol bzw. Schaltzeichen für die Diode ist ein Dreieck auf einer Leiterbahn vor einem Sperrbalken.

Unter Voraussetzung der (technischen) Stromrichtung von der Anode links zur

1. Grundsätzliches zur LED

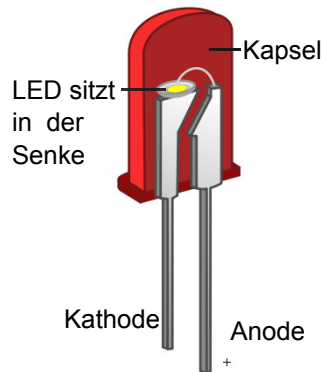


Abbildung 1.1.: gekapselte 2-Pin-LED

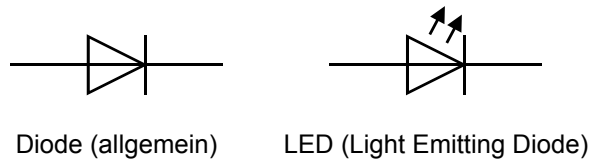


Abbildung 1.2.: Schaltsymbol Diode/LED

Kathode rechts symbolisiert das Dreieck die Durchlassrichtung und der senkrechte Balken die Sperreigenschaft der Diode als Isolator, falls die Stromrichtung getauscht würde. Der Unterschied zwischen Diode und LED liegt in den 2 schräg nach oben zeigenden Pfeilen. Sie symbolisieren die Licht emittierende Eigenschaft dieser speziellen Diode.

1.2. MYTHEN um die LED

Um alles, was der Mensch so schnell nicht durchschaut ranken sich gerne und schnell hartnäckige, oft obskure Vorurteile mit dem Hang, sich gegen entsprechende Aufklärung permanent zu immunisieren... . Natürlich gibt es solche Mythen auch zum Thema LED.. sehr oft wird zu wenig darüber gewusst, und/oder einfach zu stark verallgemeinert, und/oder die technische Weiterentwicklung ganz bewusst außer Betracht gelassen... (Wenn Sie dieses Buch gelesen haben sind Sie dafür garantiert nicht mehr anfällig...) Noch bevor wir uns im Detail mit dem Hintergrundwissen um die LED beschäftigen, sollen zuerst einmal die fünf gängigsten

1.2. MYTHEN um die LED

Mythen klargestellt werden:

Mythos 1: Die LED macht kein qualitativ gutes Licht

Dieses Vorurteil stimmt so schon lange nicht mehr, sonst hätten die LEDs keine Chance auf dem Beleuchtungsmarkt. Laut aktueller EU-Verordnung müssen für die Farbtreue des Lichts alle einen CRI-Wert von 80 und mehr haben. LEDs liegen damit weit über der Farbtreue gängiger Leuchtstofflampen (Energiesparlampen). Mit sehr hochwertigen LEDs sind CRI-Werte bis zu 98 möglich. Die verwendete Lichtfarbe selbst, sei sie eher warm-weiß, neutral-weiß oder kalt-weiß, ist eigentlich eher Geschmackssache als Qualitätsmerkmal. In kälteren Regionen z.B. wird fürs Zuhause gerne gemütlich warmes Licht bevorzugt, in südlichen Ländern wird im Gegensatz dazu lieber neutral-weißes Licht eingekauft und für schön befunden.

Mythos 2: LEDs senden ungesundes Licht aus..

Diese Anschuldigung ist verwandt mit vorigem Vorurteil. Oft wird mit dem relativ eingeschränkten Lichtspektrum der LED argumentiert. Die Argumente der LED-Skeptiker beziehen sich regelmäßig auf das relativ breite Tagesspektrum des natürlichen Sonnen-Lichts. Fraglich, weil unbewiesen, ist allerdings, ob die Behauptung stimmt, dass ein breiteres Lichtspektrum überhaupt gesünder sei.

Richtig ist, dass eine einzelne LED aufgrund ihres Phosphors tatsächlich eine bestimmte Farbtemperatur aufweist. Es existieren aber auch schon länger LED-Leuchten auf dem Markt, die verschiedene weiße Lichtfarben durch die gleichzeitige Verbauung unterschiedlich weiß farbiger Chips kombinieren. Auch durch den gleichzeitigen Einsatz verschiedener Phosphore, kann z.B. bei LED-Lampen mit Remote-Phosphor Technik, ähnlich wie bei der Leuchtstoffröhre, ein relativ breiteres Spektrum erreicht werden. Da die gängige LED keinerlei UV- bzw. Infrarotlicht ausstrahlt, könnte man das LED-Licht z.B. ganz im Gegensatz zum Vorurteil auch als relativ gesünder betrachten.

Medienwirksam warnen immer wieder selbsternannte Experten vor den „Gefahren des blauen LED-Lichts“ für die Netzhaut. Es sind die gleichen Leute, die uns eingeredet haben, dass die Xenon-Scheinwerfer beim Auto für uns schädlich seien. Diese Angstmacher haben, dem Herrn sei's gedankt, lediglich dahingehend recht, dass es noch nie gesund war, direkt und ungeschützt in

1. Grundsätzliches zur LED

eine starke Lichtquelle jeglicher Art zu blicken...

Mythos 3: LEDs rechnen sich noch nicht bzw. LEDs rechnen sich immer..

Stand aktueller Technik, mit einer Effizienz deutlich über 100 lm/W, belaufen sich die Amortisation-Zeiten beim Austausch der allermeisten älteren konventionellen Leuchten durch LED-Lampen schon sehr oft unterhalb von 2 Jahren. In einigen Fällen, in denen relativ neue Leuchtstofflampen in Verbindung mit elektronisch geregelten Vorschaltgeräten im Einsatz sind, wie dies z.B. für T5 Röhren mit EVG zutrifft, empfiehlt sich ein Tausch rein aus Gründen der Kostenersparnis / Energieeffizienz derzeit insgesamt noch nicht, da diese Lampen durch intelligente Ansteuerung bereits mit relativ hoher Effizienz arbeiten, die geringe Stromersparnis den Kauf kaum rechtfertigt.

Mythos 4: LEDs sind grüne Technologie

Dieses grüne Image entstand gleich zu Beginn der LED - Kommerzialisierung als verkaufsförderndes Argument für die seinerzeit noch relativ leistungsschwachen und teuren LEDs und bezog sich hauptsächlich auf den Vergleich zur Quecksilber-haltigen Leuchtstoffröhre. Insbesondere in USA und China wurde und wird heute noch mit dieser wirksamen Übertreibung gearbeitet. In Wirklichkeit hat die LED aufgrund Herstellungsaufwand, Transportkosten und Abhängigkeit von Treiber-Elektronik, mit ihren teilweise kurzlebigen und ökologisch zweifelhaften Ingredienzien, keine so positive Ökobilanz wie behauptet. Dazu kommt, dass der nötige Heatsink aus Aluminium bei seiner Herstellung viel Strom verbraucht. Lediglich durch die lange Lebensdauer der LED und ihren relativ geringeren Stromverbrauch fällt sie in der Bilanz vergleichsweise relativ besser als die Leuchtstofflampe aus.

Mythos 5: LEDs setzen 100 % des Stroms in Licht um

Solche Behauptungen liest man regelmäßig in schlecht recherchierten journalistischen Beiträgen und Wikis von LED-Shops. Das stimmt leider auch nicht. Die LED hat einen Wirkungsgrad von derzeit 20-30%. Die restliche Energie von entsprechend 70-80% geht als Wärmeenergie verloren. Der Wirkungsgrad wird sich in Zukunft sicher erhöhen, mit dieser Technologie aber sehr wahrscheinlich nicht über 50%. Dennoch ist die LED damit viel effizienter als die meisten konventionellen Techniken zur Lichterzeugung.

1.3. Der Beleuchtungsmarkt und die LED

Betrachten wir zunächst die treibenden Kräfte für die Herstellung bzw. den Verkauf der LEDs. Je nach individuellem Wohlstand können wir uns nicht nur entsprechend viel moderne Geräte kaufen, in denen LEDs verbaut sind, wir können auch mehr oder weniger Geld für Allgemeinbeleuchtung ausgeben, sei es bei Neueinrichtung oder dem Austausch bestehender Beleuchtung. Angebot und Nachfrage nach Beleuchtungs-Produkten sollten sich wie in jedem funktionierenden Markt mittelfristig ausgleichen. Technische Innovationen, wie die LED eine darstellt, sorgen dabei regelmäßig für einen deutlichen, wenn auch relativ kurzfristigen Anstieg der Verkaufszahlen, dessen Geschwindigkeit dabei auch über den Preis mit beeinflusst wird. Die Anbieter versuchen attraktive Produkte zu platzieren, die regelmäßig zu Beginn relativ teuer sind, weil entsprechend wenig Menge davon hergestellt wird. Der Handel erzielt damit im Vergleich zum Hersteller höhere Gewinnmargen als mit der Vorgängertechnologie. Die Nachfrageseite beschränkt sich deshalb zu Beginn auf zahlungskräftige Kunden, oder solche, die aus einer gewissen Notwendigkeit heraus kaufen, bis der Preis in Phase 2 auch für durchschnittliche Käufer attraktiv wird und niedrigere Margen für die Anbieter und Händler durch höhere Verkaufszahlen abgefangen werden können. In Phase 3 sinken Marge und Menge wieder, wenn Hersteller bereits Nachfolgetechnologien in petto haben und die Kauflaune beim Kunden dadurch sinkt. Wir befinden uns aktuell bereits in Phase 2, denn die LED ist trotz relativ höherer Kosten im Vergleich zu der Vorgängertechnologie bereits zum Massenartikel geworden, auch wenn für den Laien die Preisfindung bzw. der Preisunterschied zu Vorgängertechnologien oft völlig im Unklaren bleibt.

1.3.1. Angebotsseite des LED (-Chip) Marktes:

In 2013/14 bestanden nach Angaben der LED-Branchenvertreter tatsächlich gewisse Überkapazitäten auf der Produktionsseite. Rein mengenmäßig ist China mit ca. 65 – 70 Epitaxie-fähigen LED-fabs seit 2012 der führende Hersteller. Allerdings besteht hier ein Produktivitäts- wie auch ein Know-how-Problem bei der blauen/weißen LED, was zu sinkenden Umsätzen und geringeren Profiten führt und letztlich die Anzahl chinesischer LED-Produzenten deutlich verkleinern wird. An Chinesischen Universitäten wird zwar gezielt im Bereich LED-Fertigung geforscht, die erfolgreichen Absolventen werden aber nicht selten von taiwanesischen oder US-Unternehmen abgeworben, die wesentlich bessere Löhne anbieten können. In China werden LEDs in 2-Inch- und 4-Inch-Technologie mit relativ geringerer Leistung/Effektivität und relativ älterer Technologie hergestellt. Die chinesische LED-Industrie ist hauptsächlich

1. Grundsätzliches zur LED

auf die Sektoren Allgemein-Beleuchtung und Displays ausgelegt. Die Angaben zu chinesischen Herstellern sind leider je nach Quelle sehr widersprüchlich, was vielleicht auch daran liegt, dass der Staatsapparat diese Schlüsseltechnologie (noch) kontrolliert. Mangels Bekanntheitsgrad für uns in Europa sei deshalb auf eine Auflistung der Unternehmen hier komplett verzichtet. An nachfolgenden Positionen in puncto Produktions-Kapazität liegen Taiwan, Japan und Korea. Der Rest verteilt sich auf diverse Regionen wie Malaysia, Singapur, USA und Europa, wo die westlichen Hersteller aktiv sind.

Die gesamten Errichtungs- und Ausstattungskosten für eine Epitaxie-fähige LED-fab beginnen, laut dem Halbleiterbranchenverband Semi (Semiconductor Equipment and Materials International), bei ca. 60 Mio. Dollar für eine kleine (z.B. 2inch-Wafer-) Fabrik, für eine große Fab zur Herstellung mit neuester Technologie werden es schnell 150 Mio. \$ und mehr. Stand 2013 existieren laut Semi ca. 160-170 epitaxiefähigen LED-Hersteller, mit einem oder mehreren Produktionsstandorten, je nach dem wie eng oder weit man den Begriff Hersteller definiert. Führende LED-Hersteller sind u.a. Nichia (Japan), Samsung LED (Süd-Korea), OSRAM Opto Semiconductor (Deutschland), LG Innotek (Süd-Korea), Seoul Semiconductor (Süd-Korea), Cree (USA), Philips Lumileds (Niederlande), Sharp (Japan), Toyoda Gosei (Japan) und Epistar (Taiwan).

Neben diesen echten LED-Herstellern gibt es auch sehr große Unternehmen wie die taiwanesischen Firmen Everlight, größter LED-Chip Hersteller mit ca. 6500 Mitarbeitern (2013) oder Lite-On, die man Packager nennt, weil sie die LED i.d.R. nicht selbst produzieren, sprich keine Epitaxie fahren, sondern die LED im großen Stil als Vorprodukt zukaufen, um selbst daraus LED-Chips, LED-Module, Displays oder Lampen/Retrofits zu bauen. Diese Unterscheidung in Epitaxie-fähige Hersteller und solche, die keine Epitaxie betreiben ist der Grund für anscheinend widersprüchliche Rankings der globalen LED-Hersteller, die sich oft nur auf die Verkaufszahlen eines bestimmten LED-Chips mit hoher Nachfrage beziehen.

Auch in Europa werden trotz der höheren Fertigungs-Kosten sehr hochwertige LEDs gefertigt, z.B. von den traditionsreichen Lampenherstellern Philips in Eindhoven und Osram in Regensburg. Philips Lumileds, die LED-Sparte der „Royal Philips“ hat seinen Hauptsitz in San Jose/California und produziert auch in den Niederlanden, Malaysia und Singapur. Osram Opto Semiconductors, Teil der OSRAM Licht AG, sitzt in Regensburg und fertigt auch in Malaysia und seit kurzem auch in China.

1.3. Der Beleuchtungsmarkt und die LED

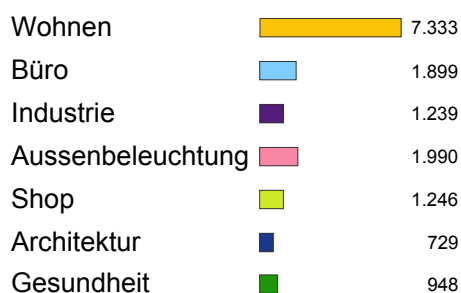
1.3.2. Nachfrageseite des LED-Marktes:

Letztlich sind zwar die Endkunden diejenigen, die die LED als Bestandteil einer(s) Lampe/Leuchte/Displays nachfragen, bezahlen und von dieser Technologie profitieren, starke Kräfte für die LED-Entwicklung und ihren Einsatz in Leuchten und Geräten sind aber auch die Leuchten- und Konsumgüter-Hersteller. Sie müssen, um den Wettbewerb in ihrem Technik-Segment bestehen zu können, dem Endkunden ein State-Of-The-Art Produkt anbieten und deshalb auf die neueste LED-Generation zurückgreifen.

Technische Diversifikation: Die LED-Nachfrage verteilt sich auf 4 Märkte unterschiedlicher Anforderungen:

1. Generelle Beleuchtung (Retrofits, Leuchten für Innen und Außen:
Qualität, Leistung und Lebensdauer spielen eine entscheidende Rolle. Gefragt sind leistungsfähige LEDs mit relativ hoher Farbtreue (hohe CRI-Werte).
2. Unterhaltungselektronik (TV-, Computer- und Telefon-Displays, ..):
Die Lebensdauer dieser Produkte ist limitiert, Qualität ist nicht so wichtig wie Fertigungskosten...
3. Automotive (Innenraum, Instrumente und Aussenlicht):
Die Autoindustrie fragt langlebige, sehr hochwertige und leistungsstarke LEDs nach, die oft speziell für diesen bestimmten Einsatz konzipiert werden.
4. Digitalanzeigen (Signal-, Anzeigen-, Werbe- und Beschilderung-Technik):
Mittelstarke LEDs, oft auch RGB werden auch für sehr große Display-Flächen nachgefragt. Größter Produzent ist wieder China mit einem Weltmarktanteil von 85% in 2012.

EU - Allgemein-Beleuchtungsmarkt nach Anwendungsbereichen



Anteil in Mio € (2011)

Abbildung 1.3.: Beleuchtungsmarkt nach Anwendungsbereichen

1. Grundsätzliches zur LED

Den Löwenanteil der Allgemeinbeleuchtung macht Wohn-Beleuchtung aus. Das liegt daran, dass es weit mehr Wohnungen als Arbeitsplätze und Einrichtungen gibt, d.h. die Leuchtenzahl pro Einwohner in diesem Segment am höchsten ist.

Der Hochtechnologie-Konsumgüter-Markt für LED-Beleuchtung löste 2012 im Volumen den bis dato an Stückzahl global führenden Markt für Unterhaltungselektronik ab, ein Zeichen dafür, dass sich die LED als Standard-Lichtquelle mehr und mehr durchsetzt. Die Marktdurchdringung der LED am globalen Beleuchtungsmarkt steigt kontinuierlich und ist anteilmäßig (nicht mengenmäßig) relativ gleich auf die Weltregionen verteilt. China spielt derzeit eine kleine Vorreiter-Rolle, weil die Nachfrage nach Beleuchtung riesig ist, Afrika und Südamerika hängen aus Wohlstands-Gründen etwas hinterher.

Anteil der LED in % am gesamten Beleuchtungsmarkt

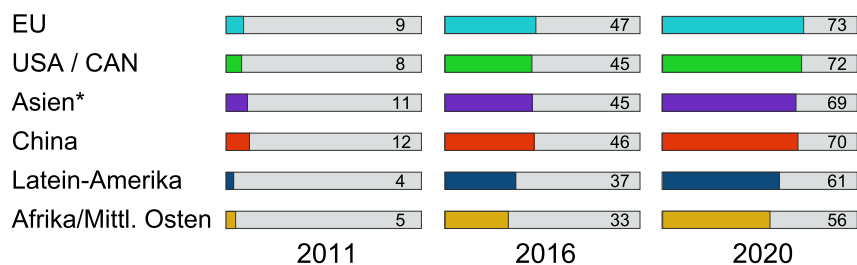


Abbildung 1.4.: LED-Anteil am globalen Beleuchtungsmarkt

Der globale Markt für Beleuchtung wächst an sich unabhängig von der LED-Entwicklung weltweit, weil der steigende Wohlstand der rasch zunehmenden Weltbevölkerung sich in besseren Wohn- und Arbeitsbedingungen und somit hochwertigerer Beleuchtung niederschlägt. In 2012 betrugen die Beleuchtungsausgaben allein in Europa ca. 16 Milliarden, in Asien bereits 23 Milliarden Euro. Bis 2020 werden allein für Asien nach einer aktuellen Studie von McKinsey 38 Milliarden Euro geschätzt.

Aktuelle Zahlen aus 2016 beziffern den globalen LED-Markt mit 30 Milliarden US-Dollar (Quelle: Trendforce).

Die Verdrängung der Glühlampe aus Energiespargründen und wegen entsprechender gesetzlicher Vorgaben, hat bis vor kurzem für ein mengenmäßige Vorrangstellung der Leuchtstoff- und Kompaktleuchtstofflampen gesorgt. Die großen Leuchtmit-

1.3. Der Beleuchtungsmarkt und die LED



Abbildung 1.5.: Volumen des Beleuchtungssektors

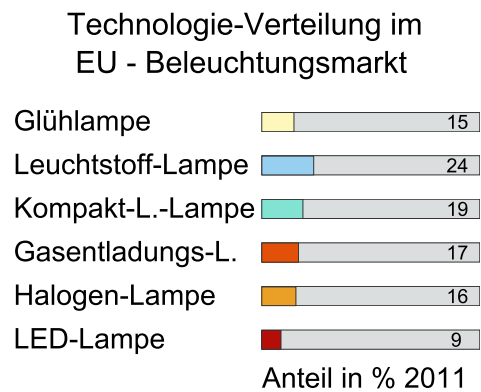


Abbildung 1.6.: Technologische Aufteilung des Beleuchtungsmarktes

telhersteller sind daher zuletzt zweigleisig gefahren: Einerseits haben sie versucht, noch möglichst viele dieser „alten“ Leuchtmittel zu verkaufen, da dafür keine neuen Investitionen in Entwicklung und Produktion mehr nötig waren und die Gewerkschaften in Europa die schnelle Schließung der Werke verhindert haben, andererseits haben sie auf technologischer Seite durch Forschungs- und Entwicklungsarbeit alles getan, um beim Wechsel in die neue LED-Technologie die alte Vormachtstellung im Massengeschäft beizubehalten.

1. Grundsätzliches zur LED

Wie sich in jüngster Zeit gezeigt hat, ist diese Gleichung aber nicht ganz aufgegangen. Der rasante technologische Fortschritt hat dafür gesorgt, dass eine unübersichtliche Vielfalt an diversen Typen und Modellen entsteht. Neben Dimmbarkeit, Lichtfarbe, Leistung, Preissegment und Größe zwingen diverse Bauformen und weitere Gründe zu einer unübersichtlichen Diversifikation im Leuchtmittelbereich. Philips hält in aktuellen Katalogen z.B. über hundert verschiedene Artikel an LED-Leuchtmitteln vor, die allesamt bereits nach wenigen Monaten technisch und preislich überholt sind. Der Verkauf der unrentablen Philips Leuchtmittelsparte ist daher inzwischen schon beschlossen. Osram z.B. wägt aktuell im Januar 2016 noch zwischen Ausgliederung oder komplettem Verkauf der Lampensparte ab. Dafür liegen von fünf kaufkräftigen chinesischen Bewerbern bereits Kaufangebote vor.

Auf technischer Seite kann die LED jetzt fast alle Konkurrenzprodukte älterer Technologie adäquat ersetzen und es ist abzusehen, wann Preisgleichheit eingestellt wird.. Aufgrund gesetzlicher EU-Restriktionen zur Stromersparnis werden bestimmte Technologien wie Leuchtstoff- und Induktionslampen von den Herstellern nicht mehr mit Entwicklungs- und Forschungsanstrengungen weiter verfolgt.

Kapitel 2

Geschichte der LED

Die Geschichte der LED ist eng mit der Geschichte der modernen Halbleiterelektronik verknüpft. Sie beginnt also mit dem Halbleiter-Zeitalter in den Forschungslabors von Universitäten und Technologiefirmen auf dem nordamerikanischen Kontinent.

- 1951: Kurt Lehovec, ein Pionier der Halbleiter-Forschung, beschrieb physikalisch korrekt die wesentlichen Vorgänge der Lichtemission beim p-n-Übergang in Licht-emittierenden Halbleiterdioden, ohne sich in darauf hin intensiv mit LEDs weiter zu beschäftigen.
- 1961: Für UV-Licht ausstrahlende LEDs, werden i.d.R. die beiden Amerikaner Bob Biard und Gary Pittman genannt. Beide waren seinerzeit bei Texas Instruments angestellt und entdeckten 1961 die Leuchtfähigkeit einer Gallium-Arsenid-Diode im unsichtbaren UV-Bereich. Daraus entwickelten sie die SNX-100, eine Art Lichtschranken-Vorrichtung, die bereits 1962 in IBM-Lochkarten-Rechenmaschinen zur Erkennung des Lochmusters eingesetzt wurde.
- 1962: Eigentlicher Erfinder der LED, die sichtbares Licht ausstrahlt, ist der amerikanische Wissenschaftler Nick Holonyak, der 1962 bei General Electrics (GE) die erste rote LED und fast gleichzeitig auch den ersten Halbleiter-Laser mit sichtbarem Licht entwickelte.
- 1989: Der japanische Wissenschaftler Isamu Akasaki entwickelt an der Universität von Nagoya die erste effiziente, leuchtstarke blaue LED auf Gallium-Nitrid (GaN) – Basis. Ihm und seinen Kollegen war es gelungen, die technisch schwierige p-Dotierung des GaN Halbleiters erfolgreich mit Magnesium durchzuführen.
- 1992: Dem Japaner Shuji Nakamura gelingt bei seinem Arbeitgeber Nichia in Japan, der blauen GaN-LED, an der er ebenfalls seit 1990 forschte mit Hilfe von einer geeigneten Phosphor-Beschichtung weißes Licht zu entlocken. Dieses technische Prinzip hat sich bis heute durchgesetzt.

2. Geschichte der LED

Reifere Leser erinnern sich vielleicht (wie ich auch..) noch gut an das Auftauchen der ersten roten LEDs z.B. in den Displays der ersten Digital-Armbanduhr oder Taschenrechner. Wer z.B. ein frühes VW-Golf Modell gefahren hat, konnte den Einzug der kleinen bunten Lämpchen in die Automobiltechnik bestaunen. Im Armaturenbrett waren dort gelbe, grüne und rote LEDs, als Kontrollanzeigen verbaut. Da es seinerzeit noch keine brauchbare blaue LED gab, musste VW beim Kraftfahrtbundesamt eine Ausnahmegenehmigung für die ersatzweise eingesetzte gelbe LED zur vorgeschriebenen blauen Fernlichtanzeige beantragen, die in jedem Golf Fahrzeugschein ganz hinten eingetragen wurde. Eine blaue LED war dann zwar bald zur Verfügung, sie basierte aber auf dem indirekten Halbleiter Siliciumcarbid und konnte sich wegen der sehr schwachen Licht-Leistung nicht am Markt durchsetzen.

Viele Köpfe in Wissenschaft und Industrie forschen seit 1992 an unterschiedlichen Wegen, den Wirkungsgrad der LED weiterhin zu erhöhen, sprich aus der aufgewendeten elektrischen Leistung möglichst viel Licht-Leistung zu erhalten. War diese Effizienz anfänglich noch bei weniger als einem Lumen pro Watt, erreichen gängige LEDs zwischenzeitlich durchaus 140lm/W oder mehr. Ähnlich dem Moore's Law - Zyklus der Computerindustrie, wird nach Haitz'-Law pro Jahrzehnt eine Erhöhung der Lichtausbeute um den Faktor 20 erwartet. Der Höchstwert für monochromatisches Licht liegt theoretisch bei 683 lm/W und der Maximalwert für polychromatisches weißes Licht bei ca. 250 lm/W, so bleibt es abzuwarten wie schnell es mit der aktuellen Technologie weitergeht.

Kapitel 3

Wie funktioniert eine LED?

Wissen Sie eigentlich, wie die Leuchtstofflampe in Ihrem Büro funktioniert, oder der Scheinwerfer im Auto, oder... die gute alte Glühbirne? Und überhaupt, was ist Licht... warum gibt es Farben?

Die meisten von uns haben zu Schulzeiten schon mal davon gehört.. und einige wenige kennen sich da sogar genau aus... Im Normalfall stellen wir uns im Alltag solche grundsätzlichen Fragen eher nicht, denn wir sind es gewohnt mit einer Vielzahl von nützlichen, technischen Errungenschaften umzugehen, ohne hinterfragen zu müssen, welche physikalischen Ursachen zugrunde liegen oder welche Prinzipien beteiligt sind. Die Produkte des Alltags sind inzwischen derart komplex geworden, dass es unmöglich geworden ist, zu allen ein entsprechendes Wissen zu erlangen. Dazu kommt, dass unserer menschlichen Wahrnehmung so manches fast komplett verborgen bleibt, z.B. weil unsere Sinnesorgane nicht darauf eingerichtet/spezialisiert sind, oder die Vorgänge z.B. zu schnell ablaufen. Viele Errungenschaften der modernen Technik basieren auf der Wirkung des elektrischen Stromes, der für uns unsichtbar und unfassbar bleibt. Elektrische Geräte sind heutzutage sehr anwendungsfreundlich konzipiert, man betätigt einen Schalter und schon geht's los. So wird auch das künstliche Licht bei Dunkelheit einfach angeknipst und nur in den selteneren Fällen müssen wir zur Lichterzeugung selbst mehr in Aktion treten, um z.B. für einen Leuchtmitteltausch zu sorgen.

3.1. Funktionsweisen traditioneller Lampen im Vergleich

Weil die LED ganz anders als die Mehrzahl der herkömmliche Lampen funktioniert, sei an dieser Stelle zum anschaulichen Vergleich zunächst die Lichterzeugung älterer Beleuchtungstechnologie auf den Punkt gebracht:

- Kerze: Sie funktioniert im Prinzip wie ihr Vorgänger die Öllampe bzw. ein brennender Holzspan: Das Licht entsteht durch die Vergasung von ursprünglich

3. Wie funktioniert eine LED?

festen Kohlenwasserstoff-Verbindungen und ihre anschließende Verbrennung. Das Kerzenwachs wird von der Flammenhitze verdampft und verbrennt dann in 4 Bereichen mit unterschiedlichen Temperaturen, je nach dem, wie viel Sauerstoff der Flamme dort zur Verfügung steht. In der ersten Zone kommt es bei ca. 600-800° C neben dem Verdampfen nur zu einer ungenügenden Verbrennung. Der Übergang zur Zone 2, in der ca. 1000° C herrschen leuchtet durch die Verbrennungsgase dabei bläulich. In Zone 3 werden bei ca. 1200° C die aufsteigenden Gase in einer unvollständigen Verbrennung zu Wasserdampf und Kohlenstoffteilchen (Ruß) zerlegt, wobei die Rußteilchen zum Glühen gebracht werden. Dieses Glühen der winzigen Teilchen erzeugt das warm-weiße Kerzenlicht. In Zone 4 am Flammenrand findet bei 1400° C dank der relativ größten Verfügbarkeit von Sauerstoff dann noch eine (bis auf den Rauch fast) vollständige Verbrennung der Rußteilchen statt, die aber nicht weiß leuchtet.



Abbildung 3.1.: Kerzenlicht durch leuchtende Verbrennungsgase

- Glühlampe: Ein dünner Draht aus Wolfram, dem Metall mit dem höchsten Schmelzpunkt, wird mittels Stromdurchfluss zum Glühen und Leuchten bei Temperaturen von 1500 (normale Glühbirne) bis -3000° C (Halogenlampe) gebracht. Damit er nicht bald völlig verbrennt, befindet er sich in einem abgeschlossenen Glaskörper, der Luft-evakuiert oder mit unbrennbarem Schutz-Gas, oder wie bei Halogenlampen mit Fluor oder Chlor gefüllt sein kann. Wie die LED auch, zählen die Glühdrahtlampen zur Kategorie der Festkörper-Leuchtquellen.
- Leuchtstofflampe: Umgangssprachlich fälschlicherweise auch als Neonröhre

3.1. Funktionsweisen traditioneller Lampen im Vergleich

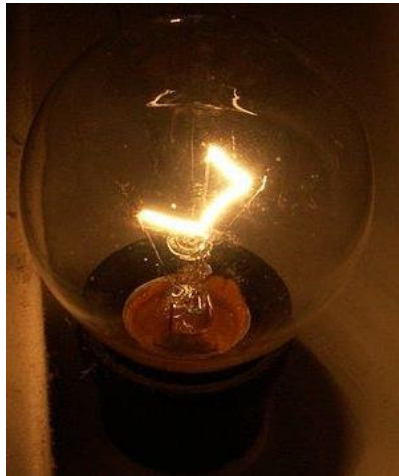


Abbildung 3.2.: Lichterzeugender Glühdraht der Glühbirne

bezeichnet ist wie ihr Verwandter die Kompakt-Leuchtstofflampe (Energiesparlampe) von der Technik her eine sogenannte Gasentladungslampe, deren Innenseite des Glaskolbens mit einem Leuchtstoff beschichtet ist. Im Glaskolben wird ein Gas-Quecksilberdampf-Gemisch mittels zweier Elektroden und angelegter Hochspannung gezündet. Das Gas wird durch die zugeführte Energie des zwischen den beiden sich am jeweiligen Ende befindlichen Elektroden durchfließenden Stroms zum ionisierten, abstrahlenden heißen Plasma. Dieses Plasma sendet dabei so gut wie kein sichtbares Licht aus, sondern hauptsächlich unsichtbares UV-Licht, welches auf die aus einem Phosphor-Gemisch bestehende Leuchtstoffschicht auf der Innenseite des Glaskolbens trifft und diese dünne Schicht dadurch zum Leuchten anregt. Somit verlässt dann sichtbares Licht den Glaskolben nach außen und die übrig gebliebene, eher ungesunde UV-Strahlung, die zwischen den Phosphor-Teilchen noch ungehindert durchkommt, wird dann weitgehendst vom Glas zurückgehalten. Leuchtstofflampen der letzten Generation wurden von den Herstellern mit elektronischen Vorschaltgeräten ausgestattet, die eine hohe Zündspannung von 1000 Volt bereitstellen und dann auf ca. 50V AC herunter regeln, um dadurch eine relativ lange Lebensdauer der Lampe zu gewährleisten. Die schärfste Kritik an den Leuchtstoff- bzw. Energiesparlampen ist die Verwendung von giftigem Quecksilber, das bei Glasbruch oder bei der nicht fachgerechten Entsorgung in die Umwelt gelangt. Hochwertige Kompaktleuchtstofflampen werden vorgeheizt, um die Lebensdauer zu verlängern, deshalb stellt sich die volle Leuchtkraft erst nach ein paar Sekunden ein, was sehr unpraktisch ist.

3. Wie funktioniert eine LED?



Abbildung 3.3.: Kompakt-Leuchtstofflampe

3.2. Das optoelektronische Wirkungsprinzip der LED

Was geschieht in/mit der LED, wenn sie durch Anlegen einer Stromspannung zum Leuchten gebracht wird? Die Beantwortung dieser Frage, bzw. das Wissen darum ist für das korrekte Betreiben von LEDs grundlegend.

Die LED funktioniert wie eine Halbleiter-Diode, die zusätzlich zu den typischen Dioden-Eigenschaften Licht aussendet, was andere Dioden i.d.R. nicht können. Halbleiter aller Art sind heutzutage aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken, sie stecken in jeder Elektronik und bilden sozusagen die Grundlage für unsere Errungenschaften des Informationszeitalters. Wer verstehen will, warum die LED ein Kind unseres auf den Halbleiter basierendes Computerzeitalters ist, und wie eine LED überhaupt Licht aussendet, kommt nicht umhin, einen tieferen Blick bis auf die Physik auf atomarer Ebene zu werfen. Dann wird auch eher verständlich, warum die Industrie bei der LED-Herstellung so einen großen Aufwand betreiben muss und warum die LEDs immer relativ teuer in der Herstellung sind.

Zum Verständnis dieser elementaren Vorgänge werden im Folgenden Modelle benutzt, die die tatsächlichen Vorgänge in der LED als prinzipielles Schema wiedergeben. Sie dürfen nicht als exakte 1:1 Abbildung der Realität verstanden werden. Für das prinzipielle Verständnis dieser Modelle reichen eine gute Vorstellungskraft und rudimentäre Vorkenntnisse aus Schultagen völlig aus.

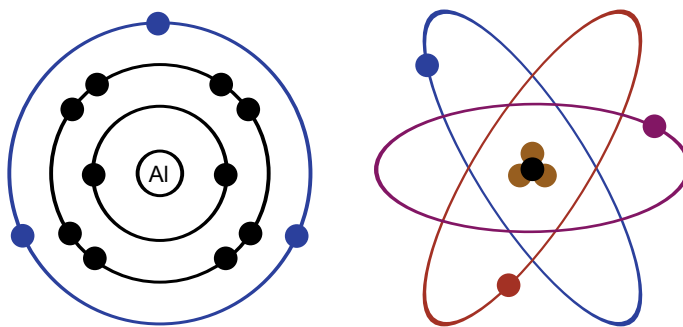
3.2. Das optoelektronische Wirkungsprinzip der LED

3.2.1. Einschub: Elektrische Leitfähigkeit

Damit überhaupt Strom fließen kann, muss eine elektrische Leitfähigkeit vorliegen. Strom fließt dann, wenn an einen Leiter eine Spannung angelegt wird, sprich an den jeweiligen Enden des Leiters ein Spannungspotential durch Ladungstrennung von positiven und negativen Ladungen besteht. Per Definition fließt der Strom vom positiven Pluspol zum negativen Minuspol, wenn ein Verbraucher, z.B. eine Lampe, in der Leiterbahn ist.

Halbleiter sind Festkörper, deren elektrische Leitfähigkeit zwischen den Leitern und Nichtleitern (Isolatoren) liegt. Unter bestimmten Umständen verhält sich ein Halbleiter wie ein Stromleiter, unter anderen aber wie ein Isolator. Vertiefen wir dazu kurz das Prinzip der elektrischen Leitfähigkeit und begeben wir uns dazu gedanklich auf die atomare Ebene.

Das Atom ist als das Stoffteilchen bestimmt, das mit chemischen Mitteln nicht in noch kleinere Teilchen zerlegt werden kann. Es hat einen Durchmesser von weniger als einem millionsten Teil eines Millimeters. Mit dem Bohr-Atommodell wird das Bauprinzip veranschaulicht:



Atommodell:
Elektronen umkreisen den Atomkern aus Neutronen u. Protonen

Abbildung 3.4.: Atommodell nach Niels Bohr

Ein Atom besteht aus drei verschiedenen Bauteilchen: Den Elektronen, den Protonen und Neutronen. Protonen und Neutronen sind relativ reicher an Masse als die Elektronen, sie befinden sich beide in der Mitte des Atoms, dem sogenannten Atomkern. Die negativ geladenen Elektronen umkreisen den Atomkern bzw. seine positiv geladenen Protonen und die sich elektrisch neutral verhaltenden Neutronen in Umlaufbahnen mit unterschiedlicher Entfernung. Man nennt diese Umlaufbahnen

3. *Wie funktioniert eine LED?*

auch Atomschalen. Weil sich Protonen und Elektronen wegen ihrer unterschiedlichen Ladung elektromagnetisch anziehen, wird das Atom durch diese Anziehungskräfte zusammengehalten. Ähnlich wie Planeten auf verschiedenen Umlaufbahnen um die Sonne kreisen und wegen der Anziehung ihrer Massen ein stabiles System bilden. Die Anzahl von Protonen und Elektronen ist in natürlichem Zustand des Atoms identisch, d.h. jedes Atom ist elektrisch ausgeglichen, verhält sich als Ganzes elektrisch neutral. Dieses natürliche Bestreben nach Ladungsausgleich bzw. Neutralität setzt sich als Fundamentalprinzip in dieser Welt überall fort.

Gedanke dazu: Bei ungleicher Anzahl von Elektronen und Protonen entsteht demzufolge ein positiv oder negativ geladenes Atom, ein sogenanntes Ion. Weil die Protonen im Atomkern eine stabilere Position als die Elektronen auf der äußersten Schale mit den kleinsten elektromagnetischen Bindungskräften besitzen, kann dieser Zustand nur durch Abgabe von Außenelektronen, oder durch Aufnahme von Fremdelektronen erfolgen. Je nach chemischer Atomart besitzt jedes Atom eine unterschiedliche Anzahl von Schalen und dementsprechend eine unterschiedliche Zahl an Elektronen insgesamt (siehe Periodensystem der Elemente im Anhang). Jede Schale kann immer nur eine bestimmte Anzahl von Elektronen aufnehmen, bis sie voll besetzt ist. Wenn die äußerste Schale nicht voll besetzt ist, d.h. weniger als 8 Elektronen aufweist, strebt die Natur danach, die Vollbesetzung durch Aneinander-Bindung von Atomen zu erreichen. Dabei können drei unterschiedliche Bindungsarten unterschieden werden:

Bei Bindungen zwischen Metallen und Nichtmetallen, der sogenannten Ionenbindung, nehmen dazu die Nichtmetalle Elektronen auf, die von den Metallen abgegeben werden. Ist die Außenschale voll besetzt, wird das Atom chemisch stabil und erreicht den angestrebten niedrigen Energiezustand, den man als Edelgaskonfiguration bezeichnet, weil die reaktionsträgen Edelgase die vollbesetzte Außenschale schon besitzen.

Bei der Bindung zwischen Nichtmetallen, der sogenannten Atombindung, teilen sich entsprechend viele Atome ihre Elektronen der Außenschale, so dass jedes Atom seine Vollbesetzung erreicht.

Bei der dritten Bindungsart, der sogenannten Metallbindung, gehen Metalle untereinander eine stabile Bindung ein, indem sie alle Elektronen der Außenschale abgeben und die Elektronen sich dann frei zwischen den nun insgesamt positiv geladenen, übriggebliebenen Atomrümpfen bewegen können. Man nennt diese Elektronen dann auch Elektronengas. Sie wirken nun wie ein Kleber, denn die positiv geladenen Atomrümpfe stoßen sich wegen identischer Ladung (alle +) eigentlich

3.2. Das optoelektronische Wirkungsprinzip der LED

gegenseitig ab, genauso wie die Elektronen untereinander (alle -) auch. Erst die Wechselwirkung der elektrischen Anziehungskräfte zwischen den freien Elektronen und Atomrümpfen, die in alle Richtungen gleichermaßen wirken, bewirken so den festen Zusammenhalt der Metallatome durch die entstandene sehr gleichmäßige Gitterstruktur.

Jedes Elektron eines Atoms besitzt genau die Energiestufe, die dem Energieniveau der entsprechenden Schale zugeordnet ist, abhängig von der Höhe / Entfernung vom Atomkern, in der es sich bewegt. Die jeweiligen Energieniveaus der Außenschale benachbarter Atome sind nahezu gleich. Deshalb kann man diese zu einem gemeinsamen Niveau, genannt Energieband zusammenfassen, um das Elektronenverhalten in der Gruppe zu veranschaulichen.

Elektrische Leitfähigkeit basiert immer auf das Vorhandensein von frei beweglichen Ladungsträgern, wie den negativ geladenen Elektronen oder Ionen (ein Ion kann auch ein geladenes Molekül sein). Das bedeutet im Umkehrschluss, dass wenn in einem Stoff keine frei beweglichen Ladungsträger vorhanden sind, spricht man von einem Isolator einem Nichtleiter.

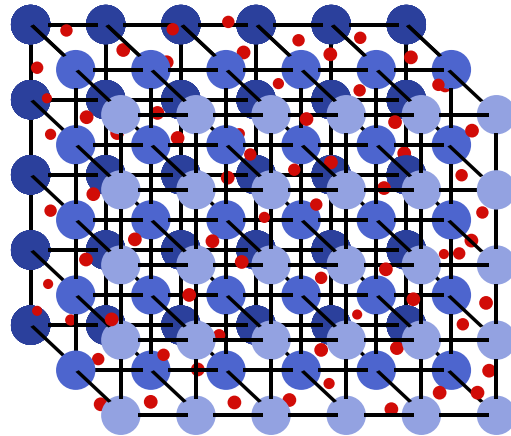
Am Beispiel von Metallen wird die Rolle der Elektronen bei der elektrischen Leitfähigkeit deutlich:

Metalle, insbesondere gute elektrische Leiter, wie z.B. Silber, Kupfer, Gold oder Aluminium, besitzen wie gerade bei der Metallbindung beschrieben, die Tendenz Elektronen der Außenschale abzugeben und sich miteinander so zu verbinden. Dabei entstehen frei bewegliche Elektronen zwischen den einzelnen Atomrümpfen. Bereits bei relativ geringer Energiezufuhr z.B. durch Erwärmen, werden die elektromagnetischen Bindungskräfte in der oben beschriebenen Gitterstruktur geschwächt und die Elektronen können sich relativ frei zwischen den Rümpfen der Atome bewegen und ihre Ladung (-) weitertransportieren und somit die Leitfähigkeit herstellen.

Nichtmetalle teilen sich wie eben beschrieben Elektronenpaare, indem jedes Atom Elektronen aufnimmt und fest einbindet, bis ein stabiler Zustand erreicht ist. Ohne freie Elektronen kann aber keine elektrische Leitfähigkeit erreicht werden, die Nichtmetallverbände wirken somit als Isolatoren.

Die elektrische Leitfähigkeit ist generell auch vom Energiezustand des Stoffes, d.h. von seiner Temperatur abhängig. Metallische Leiter leiten i.d.R. besser bei Kälte und schlechter bei Hitze, da Hitzezufuhr die Atomrümpfe in Bewegung versetzt, diese im festen Verbund zum Schwingen anregen und die freien Elektronen dazwischen infolge der heftigen Bewegungen der Atomrümpfe in ihrer eigenen

3. Wie funktioniert eine LED?



Metallgitter mit "Freien Elektronen" - (rot)
zwischen "Metallrümpfen" / Ionen + (blau)

Abbildung 3.5.: Gitterstruktur bei Metallen

Beweglichkeit mehr und mehr behindert werden. Metalle gehören deshalb zu den Kaltleitern. Isolatoren können die Strom isolierende Fähigkeit mit zunehmender Energiezufuhr verlieren, wenn bei sehr großer Hitze fest gebundene Elektronen aus ihrem Verbund herausgerissen und damit beweglich werden.

Zurück zum Halbleiter: Halbleiter liegen bzgl. ihrer Leitfähigkeit zwischen denen von Metallen (Leitern) und Nichtleitern. Halbleiter sind im Gegensatz zu Metallen häufig Heißeiter, d.h. innerhalb bestimmter Temperaturgrenzen steigt ihre Leitfähigkeit, bis zu einem bestimmten Maß, mit dem steigenden Energieniveau an. Auch hier werden dabei feste Kristall-Bindungen aufgelöst und Elektronen freigesetzt, man sagt die Defekte in der Gitterstruktur nehmen zu, was die intrinsische Leitfähigkeit erhöht.

3.2.2. Quantenmechanisches Bandmodell

Zur Veranschaulichung der Leitungsfähigkeit eines Halbleiters benutzt man das „Bändermodell“, das eine schematische Vereinfachung verschiedener Energiebereiche darstellt, um die wesentlichen Vorgänge deutlicher abzubilden:

Beim Bändermodell definiert man drei Zonen: 2 Energie-Bänder mit unterschiedlichem Leitungsverhalten, Valenzband und Leitungsband, und eine Band-Lücke mit bestimmter Breite dazwischen. Die Breite der Energiebänder selbst bestimmt

Quantenmechanisches Bandmodell

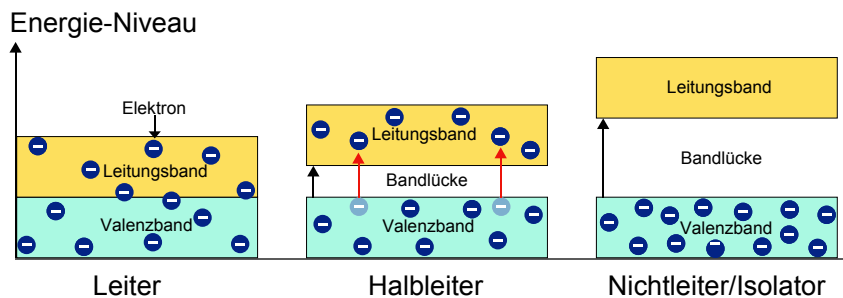


Abbildung 3.6.: Bändermodell

sich dadurch, wie hoch die Bindungskräfte der einzelnen Elektronen an ihr Atom sind. Bei sehr vielen Atomen gibt es nämlich keine eindeutige Zuordnung mehr zwischen Atom und Valenz-Elektron, die Elektronen wandern innerhalb mehrerer Rumpfatome, deshalb verschmelzen die Energiebänder der vielen einzelnen Atome untereinander zu einem einzigen Valenzband gleicher Charakteristik.

Isolatoren haben eine große Bandlücke zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband. Sie verhindert unter Normalbedingungen den Übergang der Valenzelektronen in den leitenden Bereich.

Bei Leitern existiert keine Bandlücke zwischen dem sich überlappenden Valenz- und Leitungsband.

Halbleiter liegen dazwischen, die Bandlücke ist relativ schmal, d.h. mit relativ geringer Aktivierungs-Energie kann die Lücke überwunden werden. In sehr kaltem Zustand, genauer beim absoluten Nullpunkt (0° K bzw. $-273,15^\circ \text{ C}$), befinden sich keine Elektronen im Leitungsband, weil das Valenzband voll besetzt ist, man sagt, das Fermi-Niveau ist dann Null. Der Übergang erfolgt erst bei wärmeren Temperaturen, z.B. durch Anlegen einer elektrischen Spannung ausgelöst, oder durch bloßes Erhitzen. Dann werden Atombindungen im Kristallgitter des Halbleiters aufgerissen und die Valenzelektronen verlassen das Valenzband, hinterlassen dort ein positiv geladenes Loch (= Defekt-Elektron) und erreichen das Leitungsband, wo sie sich als Ladungsträger nun frei bewegen können. Zu jedem freien Elektron existiert demzufolge immer ein entsprechenden Loch. Genau durch diesen Vorgang der Paarbildung entsteht die Eigenleitfähigkeit des Halbleiters, sowohl Elektronen und auch Löcher können jetzt wandern. In das entstandene Loch können auch

3. Wie funktioniert eine LED?

benachbarte Elektronen aus dem Valenzband fallen, man nennt das Löcher-Leitung. Wird keine weitere Energie mehr zugefügt, fallen die Elektronen aus dem Leitungsband wieder in die Löcher des Valenzbandes zurück, die Ladungen verschwinden und das Elektron wird wieder zum fest gebundenen Valenzelektron und stellt damit die ursprüngliche Kristall-Struktur wieder her. Das Elektron verliert dabei durch das Absinken auf eine Stufe mit einem niedrigeren Energieniveau einen Teil seiner Energie, der als Phonon (Quasiteilchen) oder Photon (Licht-Quant) emittiert wird, man sagt, es „rekombiniert“ dort.

Für Leuchtdioden sind nicht alle Halbleiter geeignet. Es werden sogenannte „direkte“ Halbleiter mit direktem Bandübergang bzw. „III-V - Verbindungshalbleiter“ (letzter Begriff bezieht sich auf Materialverbindungen der Periodensystem Gruppe III mit Gruppe V wie z.B. GaAs, GaN oder InGaN,.. siehe PSE im Anhang) eingesetzt, weil dort bei der Rekombination viel mehr Licht, mehr Photonen als Phononen, entsteht. Die Anregung eines Elektrons ist dort am Wahrscheinlichsten, wo sie vom Maximum des Valenzbandes ins Minimum des Energiebandes geschieht, weil sie dort Energie-technisch am günstigsten ist. Die Elektronen im Energie-ärmeren Niveau des Valenzband-Maximum behalten bei direkten Halbleitern der Gruppe III-V den gleichen Impuls wie die Elektronen im Energie-reicheren Leiterband-Minimum, es ändert sich lediglich ihr Energiewert, nicht ihr Impuls (bei Halbleitern mit Impulsänderung bei der Rekombination werden statt Photonen hauptsächlich nicht sichtbare Phononen abgegeben). Aus einem Teil des Stroms, der durch die LED fließt, entsteht in der LED somit elektromagnetische Energie, die wir als Licht wahrnehmen.

Da sowohl Energieerhaltung als auch Impulserhaltung stattfindet, ist die Energie des emittierenden Photons (= Wellenlänge) bestimmt durch die Breite der Bandlücke, d.h. sie entspricht vom Wert her der Energiedifferenz zwischen Leitungsband Minimum und Valenzband Maximum. Je nach gewünschter Wellenlänge des Lichtes, man sagt bei sichtbarem Licht auch Lichtfarbe, wählt man dazu gezielt chemisch-physikalisch geeignete Halbleiter aus und verändert zusätzlich deren Energiebandeigenschaften durch gezielte Dotierung. Das führt dazu, dass ein direkter Halbleiter / die LED ganz im Gegensatz zu thermischen Strahlern wie Glühlampen, ein sehr eng begrenztes Spektrum mit einer eindeutig dominanten Wellenlänge erzeugt, also fast monochromatisches Licht aussendet. (Wer sich an dieser Stelle wundert, was anderes gelesen, gehört, gedacht hat, sei bei seiner aufgekeimten Skepsis auf die noch zu besprechende Wirkung der Phosphorbeschichtung bei weißen LEDs verwiesen..)

3.2. Das optoelektronische Wirkungsprinzip der LED

3.2.3. Dotierung

Um die Eigenschaften des ausgesendeten Lichts zu variieren wird folgendes gemacht: In die ausgewählten Substrate, die eine sehr hohe Reinheit aufweisen müssen, werden gezielt wenige Fremdatome, sprich Atome mit anderer Valenzelektronen-Zahl, eingebracht. Damit werden sogenannte Störstellen geschaffen, um das Bandverhalten ganz gezielt zu manipulieren und somit den Spektralbereich und die Effizienz der Lichtabgabe zu ändern. Man nennt dieses Verfahren Dotieren.

Bei der p-Dotierung (p für positiv) sind die eingebrachten p-leitenden Fremdatome Elektronen-Akzeptoren. Sie sind für die Erzeugung der im Bandmodell oben schon beschriebenen frei beweglichen Löcher (Lücken) verantwortlich, die dann wegen ihrer positiven Ladung Elektronen aufnehmen können. Man sagt, die Fermi-Energie wird in Richtung Valenzband verschoben. Bei der n-Dotierung (n für negativ) werden Elektronen-Donatoren verwendet. Sie stellen schwach gebundene Elektronen zur Verfügung. Man sagt, die n-Dotierung verschiebt die Fermi-Energie aufgrund dieser Delokalisierung der Elektronen in Richtung Leitungsband.

Es wird zwischen schwacher (1:1000000) und starker Dotierung (1:1000) unterschieden, mit dem Grad der Dotierung steigt entsprechend das beschriebene Verhalten. Bei der gängigsten GaN-LED, wird zur n-Dotierung Sauerstoff verwendet, zur p-Dotierung kommt Zink und Magnesium zum Einsatz.

3.2.4. Elektrisches Verhalten des Halbleiters / der LED

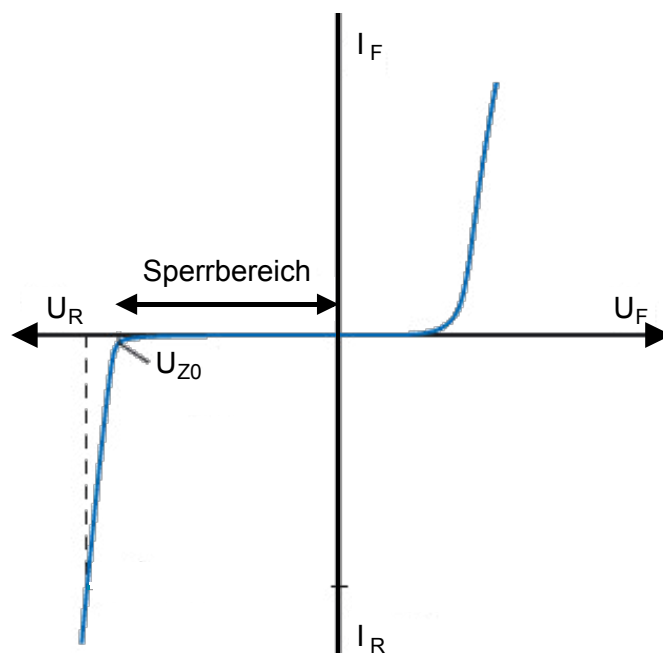
An der Grenzschicht des p-n-Übergangs passiert folgendes: Im grenznahen Bereich des n-Leiters entsteht nach dem Abwandern der freien Elektronen / der Rekombination eine positive Ladung, im grenznahen Bereich des p-Leiters entsprechend eine negative Ladung. Dadurch wird eine Spannung (= Ladungstrennung) am p-n-Übergang aufgebaut die im Verlauf ein weiteres Durchdringen der Grenzschicht von Ladungsträgern verhindert. Die Grenzschicht baut sich zur Sperrschicht auf, weil sie nahezu frei von Ladungsträgern ist und deshalb als Isolator wirkt. Der p-n-Übergang verhält sich in diesem Zustand ähnlich einem Kondensator, er besitzt eine entsprechende Sperrschichtkapazität. Diese „kapazitive Eigenschaft“ der LED wird bei der Auswahl der passenden Steuerelektronik von Bedeutung, z.B. beim Dimmen (näheres später).

Legt man an den p-n-Übergang eine Spannung mit Minuspol an den n-Leiter (Kathode) und den Pluspol an den P-Leiter an (Anode) an (Vorwärtsrichtung), befindet sich die Diode im Durchlasszustand und besitzt einen geringen Gleichstrom-

3. Wie funktioniert eine LED?

widerstand. Wenn der Plus-Pol am n-Leiter und der Minus-Pol am p-Leiter liegt (Rückwärtsrichtung), erreicht der p-n-Übergang bei angelegter Spannung einen großen (Gleichstrom-) Widerstand, die Diode befindet sich im Sperrzustand. Diese Eigenschaft der Halbleiterdioden qualifizieren sie als elektronischer Schalter oder auch als Gleichrichter.

Die Kennlinie kennzeichnet das Verhalten einer Diode/LED unter Spannung. Im Diagramm unten sind Stromstärke (I) und Spannung (U) für den normalen Betrieb in Vorwärtsrichtung (F) und Rückwärtsrichtung (R) bzw. Sperrrichtung, als sogenannte Kennlinie eingezeichnet. Die Kennlinie ist für den verwendeten Halbleitertyp spezifisch, d.h. je nach Typ variiert die Schwellenspannung von den Werten her in Vorwärtsrichtung, bzw. die Durchbruch-Spannung in Rückwärtsrichtung.



Kennlinie einer Diode

Abbildung 3.7.: Kennlinie einer Diode

Betrachten wir den Teil rechts oben: erst ab einem bestimmten Punkt verlässt die blaue Linie den Nullbereich des Stroms ($I=0$), d.h. erst ab einer bestimmten Spannung fließt überhaupt Strom in Vorwärtsrichtung. Er steigt dann aber sehr schnell (exponentiell) nach Erreichen der Schwellen- bzw. Schleusenspannung an, sprich eine kleine positive Spannungsänderung bewirkt einen relativ großen Anstieg

3.3. Die „buntfarbig“ lumineszierende Diode

der Stromstärke. Deshalb empfiehlt es sich zur Strombegrenzung von LEDs bei Verwendung von Stromquellen mit konstanter Spannung und variabler Stromstärke einen Vorwiderstand zu schalten, denn sonst kommt es schnell zur unerwünschten physikalischen Zerstörung der p-n-Schicht.

Im linken unteren Teil des abgebildeten Koordinatensystems wird das Verhalten bei Rückwärtsrichtung dargestellt. Die Diode sperrt bei Änderung der Stromrichtung, d.h. es fließt kein Strom bis zu einem Punkt der Spannung, an dem dann doch der elektrische Durchbruch erfolgt (= Durchbruchspannung U_{Z0}), die Elektronen aus ihrem Kristallgitter-Verbund herausgerissen werden und als bewegliche Ladungsträger funktionieren, dem sogenannten Zener-Effekt. Bis auf bestimmte Dioden (Zener-Dioden) ist dieses Verhalten unerwünscht, da dann ebenfalls sehr viel Strom zu fließen beginnt und ab einem kritischen Punkt wiederum die p-n-Sperrschicht physikalisch zerstört wird. Die eben bezeichneten Werte, in denen sich das Verhalten ändert, werden als Kennwerte vom LED-Hersteller angegeben. Sie sollten höchstens sehr kurzzeitig und im Betrag nur wenig überschritten werden, damit die Halbleiterdiode keinen Schaden nimmt.

Dioden sind aufgrund ihrer spezifischen physikalischen Eigenschaften für ganz bestimmte Arbeitsbereiche bemessen, dazu existieren Höchstwerte für Strom, Spannung und Temperatur, die beim Betreiben eingehalten werden müssen, damit die gewünschte Funktionsweise für lange Zeit sichergestellt bleibt.

3.3. Die „buntfarbig“ lumineszierende Diode



Abbildung 3.8.: Buntfarbige LEDs

3. *Wie funktioniert eine LED?*

Je nach Verwendung von bestimmten Elementen der II-V-Gruppe und entsprechend gezielter Dotierung entstehen Halbleiter / LEDs mit sichtbarem Licht in verschieden definierten Lichtfarben.

Der physikalische Grund für die unterschiedliche Farbe liegt im Erreichen eines definierten Bandabstandes zwischen Valenz- und Leitungsband. Bei der roten, relativ langwelligen LED wird relativ energiearmes Licht abgegeben, bei der blauen relativ kurzwelligen LED wird entsprechend relativ energiereiches Licht emittiert. Die Hersteller kennzeichnen bei gelben, grünen, roten und blauen LEDs die entsprechende Lichtfarbe durch die Angabe der dominanten Wellenlänge, die in Nanometer angegeben wird und den Spektralbereich kennzeichnet, den wir Menschen als rot, gelb, grün oder auch blau wahrnehmen.

Unsichtbare Wellenlängen unterhalb des roten Spektralbereiches 780 nm (bis zu 1 mm) nennt man Infrarot, Wellenlängen oberhalb des violetten Spektralbereiches zwischen 230 und 380 nm nennt man Ultraviolett.

Je nach Dotierung können meist verschiedene Halbleiter für die Erzeugung der gewünschten Lichtfarbe eingesetzt werden. Bunt-Farbige LEDs werden zu Signalzwecken und zu einfarbiger bzw. RGB-Beleuchtung eingesetzt. Durch optische Licht-Mischung von Rot, Grün und Blau können damit rein theoretisch alle möglichen sekundären Zwischenfarben erzeugt werden.

In der folgenden Tabelle auf der nächsten Seite sind gebräuchliche LED-Halbleiter, innerhalb ihres Dotierung Spielraums, bestimmten Licht-Farben zugeordnet, die damit erreicht werden können.

3.3. Die „buntfarbig“ lumineszierende Diode

Licht-Farbe	Dominante Wellenlänge λ	III-V-Halbleiter-Material
Infrarot	780 – 1000000 nm (=1mm)	• Galliumarsenid (GaAs) • Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs)
Rot	610 – 760 nm	• Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) • Galliumarsenidphosphid (GaAsP) • Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP)
Orange	590 – 610 nm	• Galliumarsenidphosphid (GaAsP) • Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP)
Gelb	570 – 590 nm	• Galliumarsenidphosphid (GaAsP) • Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP) • Galliumphosphid (GaP)
Grün	500 – 570 nm	• Indiumgalliumnitrid (InGaN) • Galliumnitrid (GaN) • Galliumphosphid (GaP) • Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP) • Aluminiumgalliumphosphid (AlGaP) • Zinkoxid (ZnO)
Blau	450 – 500 nm	• Galliumnitrid (GaN) • Indiumgalliumnitrid (InGaN) • Siliziumkarbid (SiC), Zinkselenid (ZnSe)
Violett	380 – 450 nm	• Indiumgalliumnitrid (InGaN)
Ultra-Violett	230 – 380 nm	• Aluminiumnitrid (AlN) • Diamant • Aluminiumgalliumnitrid (AlGaN) • Aluminiumgalliumindiumnitrid (AlGaInN)

3. Wie funktioniert eine LED?

3.4. Wie kommt weißes Licht aus der blauen Diode?

Wer bis hierher alles verstanden hat, und sich der Tatsache gewahr ist, dass weißes Licht polychromatisch statt monochromatisch ist, sich also aus vielen Lichtfarben zusammensetzt (Beweis: Regenbogeneffekt), weiß auch, warum es keine „weiße“ LED so geben kann, wie eine rote oder gelbe existiert! Warum?? Richtig: der entsprechende Halbleiter müsste ja in ein und demselben Zustand, also gleichzeitig, viele unterschiedlich breite Bandlücken auf einmal haben.. Was liegt dann nahe? Mehrere Bunte LEDs nahe zu gruppieren.

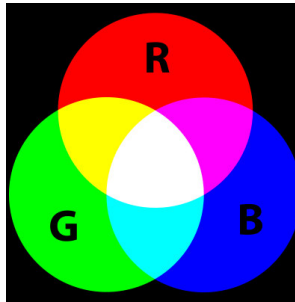


Abbildung 3.9.: Additive Farbmischung von Rot/Grün/Blau

Durch die RGB-Farbmischung aller drei Farben gleichzeitig, kann man weißes Licht als sogenannte Tertiärfarbe erzeugen. Dieses Grundprinzip mit dem Namen Additive Farbmischung, findet schon lange beim Farbfernseher seine Anwendung. Für Beleuchtungszwecke ist diese Methode aber weniger gut geeignet, da Effizienz und auch die Farbqualität gering bleiben, sprich RGB- weiß ist grau stichig und die Farben angestrahlter Gegenstände wirken in diesem Licht verändert. An den Überschneidungsrändern können außerdem farbige Schatten entstehen, besonders beim Einsatz von Linsen oder Reflektoren.

Daher wird für die Erzeugung von weißem Licht mit LEDs ein anderer Weg beschritten, der auch leistungsstarke und effiziente LEDs garantiert: die einfarbig blaue LED wird mit einem gelben bzw. auch einem Gemenge an roten und grünen Phosphoren beschichtet. (griech. Phosphore = licht-tragend) Ein Großteil des relativ energiereichen blauen Lichtes regt den Phosphor beim Auftreffen zum Leuchten an. Zusätzlich kommt es wiederum zur additiven Farbmischung zwischen dem blauen Licht des Halbleiters und dem Lumineszenzlicht der Phosphore. Ein kleiner Teil des blauen Lichtes passiert ungehindert die Phosphor-Schicht, quasi zwischen den Phosphorteilchen hindurch.

3.4. Wie kommt weißes Licht aus der blauen Diode?

Durch die Verwendung bestimmter Phosphore, ihrem Mischungsverhältnis und der Dicke der Phosphor-Schicht kann man so gezielt den Weißgrad der LED einstellen, von warm-weißen Tönen mit wenig Blauanteil und mehr Rot-Anteil bis zu kalt-weißen Farbtönen mit höherem Blauanteil.

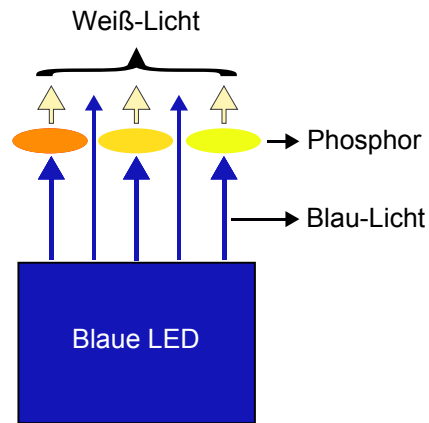


Abbildung 3.10.: Schema Weißlichterzeugung mit der blauen LED

Ein weiterer Weg, weißes Licht zu erzeugen, ähnelt dem bei der Leuchtstoffröhre. Eine UV-Licht emittierende LED trifft auf eine Tri-Phosphor-Schicht aus Blau, Rot und Grün, deren Anteile je nach gewünschter Lichtfarbe überwiegen.

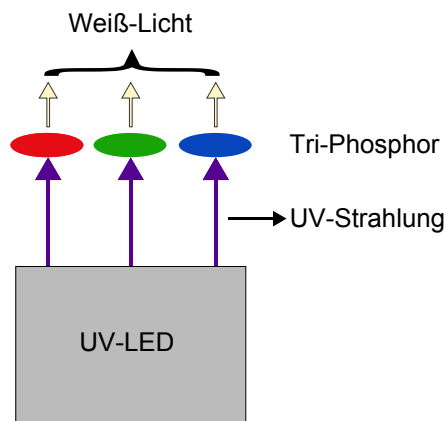


Abbildung 3.11.: Schema einer UV-LED für Weißlicht

3. Wie funktioniert eine LED?

Der Nachteil bei diesem Verfahren ist die wesentlich geringere Lichtleistung bzw. Effizienz, die nur halb so groß wie bei Blaulichtkonversion ausfällt, und so werden diese LEDs eher in geringem Umfang und zu Sonderzwecken wie z.B. auch für die Pflanzenbeleuchtung eingesetzt, wo UV-Licht durchaus erwünscht sein kann.

Wir wollen uns hier hauptsächlich mit der blauen LED in Kombination mit Phosphor beschäftigen, denn sie findet sich heute in den meisten LEDs wieder. Dazu betrachten wir zunächst den aufwändigen industriellen Herstellungsprozess.

Kapitel 4

Herstellung der blauen GaN-LED:

Die blaue LED ist nur unter großem Aufwand herzustellen. Daher hat sie als letzte der bunten LEDs die Marktreife erlangt. Dies hat unter anderem mit der Schwierigkeit zu tun, aus dem in energetischer Hinsicht gut geeigneten GaN-Material (Bandlücke entspricht 3,4 eV) genügend große Kristalle zu erzeugen, aus denen man dann die LEDs schneiden kann. Irgendwann kam ein Wissenschaftler auf die Idee, über einen Umweg das GaN-Kristall-Problem zufriedenstellend zu umgehen, er züchtete das GaN auf ein Trägermaterial auf. Eine weitere Herausforderung war es, die Dotierung, d.h. die exakte Bestimmung des elektrischen Verhaltens in den Griff zu bekommen. Inzwischen haben sich hier ebenfalls große Fortschritte eingestellt, die die Effizienz und Lichtleistung der blauen LED auf diesem Weg weiterhin ständig erhöhen.

4.1. Herstellung des Saphir-Wafers

Der LED-Chip der weißen und blauen LED basiert derzeit auf einem Saphir, der künstlich hergestellt wird. Wie der natürlich vorkommende blaue Saphir, der ein wertvoller Schmuckstein ist, besteht auch der synthetisch gezüchtete Kristall aus Aluminiumoxid (Al_2O_3), dem selben Stoff aus dem auch der rötlich gefärbte Edelstein Rubin ist. Die Schmucksteine sind mit Spuren von Metallen verunreinigt, sie geben ihnen ihre schöne Farbe. Das Blau des Saphirs kommt von Titan- und Eisenspuren, das Rot des Rubins von Chrom-Spuren.

Der Überbegriff für dieses Kristall ist Korund, die kristalline, farblose Form des Aluminiumoxids. Korund wird schon seit vielen Jahren künstlich hergestellt und insbesondere als abriebfestes Schleifmittel eingesetzt, da Korund härter als Stahl und nach dem Diamant der zweit härteste Stoff der Natur ist. Den Korund kann man je nach Verwendungszweck als Einkristall oder Mehrkristall züchten. Als Einkristall wird er hauptsächlich zur LED-Produktion nachgefragt. Wegen seiner hohen Härte und Widerstandsfähigkeit gegen Hitze, sein Schmelzpunkt liegt bei ungefähr

4. Herstellung der blauen GaN-LED:



Abbildung 4.1.: Schmuckstein Saphir

2050 Grad Celsius, wird Saphir bzw. Korund auch für Glasersatz bei Spezialanwendungen eingesetzt, wo hohe Temperaturen und Druckverhältnisse herrschen. Weitere Verwendungszwecke findet er als kratz-fester Glasersatz für Uhren oder Mobiltelefone, für die Hochfrequenztechnik, für die chemische Industrie wegen seiner Unempfindlichkeit gegenüber allen Säuren, für Kamera- und Teleskop-Optiken, oder zur zusätzlichen Beschichtung von Glas, z.B. für POS-Scanner an der Supermarktkasse, eingesetzt.

Wafer steht im Englischen eigentlich für Waffel oder Oblate. Als Wafer wird in der Halbleiterindustrie die dünne Scheibe bezeichnet, aus der die einzelnen Chips nach komplexen Herstellungsprozessen herausgeschnitten werden. Vor dem Vereinzeln / Schneiden der Chips sieht die Oberflächenstruktur der Scheibe einer Waffel von der Struktur her ähnlich, daher der Name. In der Computerindustrie wird die Wafer-Scheibe i.d.R. aus Silizium gefertigt. Silizium ist wesentlich kostengünstiger, weniger hart und daher relativ leichter zu bearbeiten. Die Herstellung von Schaltkreisen auf den Silizium-basierten Rechenprozessoren erfordert noch andere Bearbeitungsschritte wie bei der LED-Herstellung, da winzige Schaltkreise erzeugt werden müssen. Die Saphir-Wafer-Industrie profitierte aber von den langjährigen Erfahrungen und Technologien aus der Silizium-Wafer-Fertigung. Mit „Silicon-On-Sapphire“ bezeichnet man eine Technologie, die beides vereint: Rechenchips aus Silizium, die für spezielle Anwendungen auf ein Saphir-Substrat aufgebracht werden. Der Saphir-Träger verleiht dem Computerchip hohe Widerstandsfähigkeit gegen elektrische Spannungen oder z.B. hohe Strahlenbelastungen.

Der Saphir/Korund eignet sich deshalb besser als andere mögliche Trägermaterialien für den GaN-Halbleiter, weil er sehr stabil ist, durchsichtig ist (damit kann das blaue Licht durchscheinen), gute Haftungsbedingungen hat und eventuell bessere

4.1. Herstellung des Saphir-Wafers

Alternativen noch teurer ausfallen würden. Nachteilig ist die Tatsache, dass die Kristallstruktur des Korunds nicht exakt gleich der Kristallausrichtung des Galliumnitrids ist. Diese Problematik, genannt Gitterfehlanpassung, die unerwünschte physikalische Eigenschaften, wie insbesondere Defekte beim GaN in der Grenzschicht zwischen beiden Kristallen bewirkt, kann verfahrenstechnisch inzwischen jedoch auf ein akzeptables Maß minimiert werden, so dass die Vorteile des Saphirs bei der LED-Herstellung überwiegen.

Zu Beginn des GaN-LED-Zeitalters beherrschten wenige Saphir-Hersteller den Markt und konnten so satte Margen für ihre Wafer erzielen, da ihnen die Produkte förmlich aus den Händen gerissen wurden. Heute gibt es eine größere Zahl an Produzenten, es werden wohl noch mehr und die Preise sind entsprechend gefallen. Der Preisverfall findet sehr rapide statt: hat z.B. ein 4-Inch Saphir-Wafer in Q1-2011 noch 130 US-Dollar gekostet, waren es im 4. Quartal 2012 nur noch knapp 50 Dollar.

Die bedeutendsten Hersteller für Saphir-Einkristalle hinsichtlich Technologie und Menge sind aktuell immer noch die beiden Pioniere Kyocera (Japan) und Rubicon Technology (USA), sowie die koreanische STC Sapphire Technology Company, Monocrystal (Russland) und USI Optronics Corporation aus Taiwan. Daneben gibt es noch eine Handvoll weiterer Global Players und eine wachsende Zahl chinesischer Mitbewerber (Silian, Harbin Aurora, Crystaland), die hauptsächlich auf kleinere Wafer-Durchmesser spezialisiert sind, wie sie für den eigenen chinesischen Markt nachgefragt werden.

Mit der Herstellung des künstlichen Saphirs beginnt der aufwändige Fertigungsprozess einer blauen (weißen) LED. Die gesamte Prozesskette bis zur fertigen LED habe ich folgend in zwanzig einzelne Schritte unterteilt:

4.1.1. Züchtung des Saphirkristalls

Schritt 1: Kristallzüchtung

Zunächst wird ein großer Einkristall aus hochreinem Korund, der Anteil des Aluminiumoxid liegt über 99,5 Prozent, synthetisch durch sukzessive Aufzucht hergestellt. Für die Züchtung großer Einkristalle gibt es unterschiedliche Verfahren, die sich im Aufwand und dem erhaltenen Ergebnis teilweise unterscheiden. In den meisten Fällen wird ein Impf-Kristall aus Saphir in die Aluminiumschmelze getaucht und durch langsamen, kontinuierlichen Zug aus der Schmelze heraus wächst die Keimschicht durch Erstarren und damit der neue Kristall.

4. Herstellung der blauen GaN-LED:



Abbildung 4.2.: Korundschmelzverfahren bei Kyocera

Czochralsky-Verfahren:

Eine der ersten Verfahren zum Ziehen von großen Einkristallen stammt von einem polnischen Wissenschaftler Namens Czochralsky, der das Verfahren bei AEG schon 1916 entdeckt haben soll. Seit den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde und wird es noch vor allem heute für die Herstellung der Silizium-Ingots eingesetzt, aus denen später die Wafer für die Computerchips geschnitten werden.

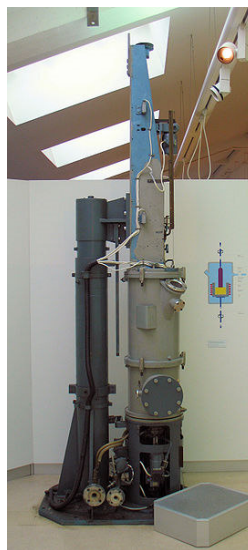


Abbildung 4.3.: Czochralsky-Kristallziehmaschine von AEG

Ein kleiner Korundkristall wird mit seiner Spitze in die bei über 2300 Grad C zum Schmelzen gebrachte Masse aus Aluminiumoxid getaucht, wobei die Ausrichtung des

4.1. Herstellung des Saphir-Wafers

Impfkristalls die spätere Ausrichtung des Einkristalls bestimmt. Ähnlich wie beim Kerzenziehen verbindet sich die Schmelze mit der geschmolzenen Impfkristallspitze. Durch langsamen Zug unter Drehung aus der Schmelze heraus, lagert sich rundum am Kristall weiteres Kristallmaterial fortlaufend in Kristallausrichtung an, erstarrt und bringt diesen so zum kontinuierlichen Wachsen, bis ein genügend großer Kegel, genannt Ingot oder Boule, daraus entstanden ist.

Technisch eng verwandt mit dem Czochralsky-Verfahren ist das sogenannte Kyropoulos-Verfahren, das sehr oft für die Saphir-Produktion verwendet wird, weil es eine relativ schnelle Wachstumsgeschwindigkeit hat.

Nacken-Kyropoulos-Verfahren:

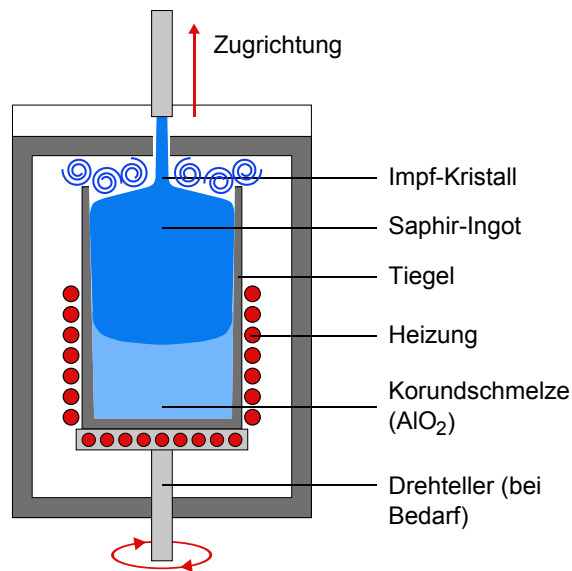


Abbildung 4.4.: Schema des Kyropoulos-Verfahrens

Saphir-Rohlinge, die mit dem Kyropoulos-Verfahren erzeugt wurden, sind am glockenförmigen Ingot (Kristall-Kegel) erkennbar. Der Namensgeber, ein deutsch-griechischer Wissenschaftler hatte es zusammen mit Richard Nacken entwickelt. Der Unterschied ist, dass hier der Keim-Kristall zwar genauso eingetaucht, aber meistens nicht in der Schmelze gedreht wird. Die Abkühlung erfolgt i.d.R. aktiv durch gezielte Abkühlung des Impfkristalls mit kaltem Helium zur schnelleren Kristallisation.

4. Herstellung der blauen GaN-LED:



Abbildung 4.5.: Saphir-Boules der Fa. Rubicon

Tiegel-Zonen-Schmelzverfahren:

Statt die gesamte Menge des Aluminiumoxids zu schmelzen, wird in einem technisch verwandten Verfahren jeweils nur die Wachstumsschicht um den Impfkristall erhitzt, das spart vor allem Stromkosten. Es wird entweder der Keimkristall oder der Tiegel bewegt, um das fortlaufende Zonenwachstum zu erreichen. Damit keine unerwünschten chemischen Reaktionen in der Schmelze ablaufen, muss mit Vakuum oder mit Schutzgasen gearbeitet werden.

Stepanov- / EFG-Verfahren

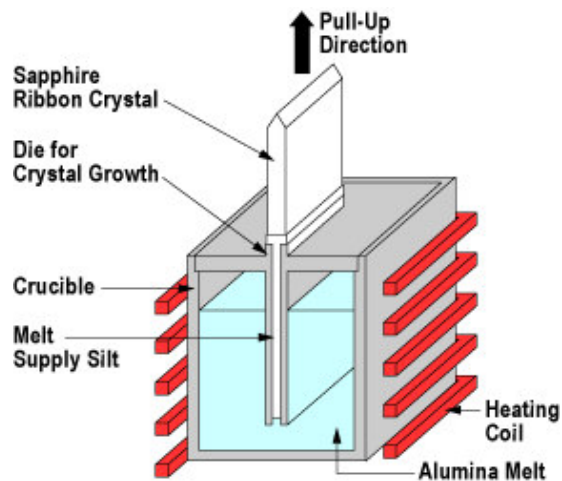


Abbildung 4.6.: Schema Stepanov-/EFG-Verfahren Fa. Kyocera

4.1. Herstellung des Saphir-Wafers

Das EFG-Verfahren erlaubt beliebig flache, rechteckige Formen aller Art und Größe. Der Impfkristall in Bandbreite zieht das angewachsene Band aus der Schmelze nach oben durch eine Matrize. Es wurde vom russischen Physiker Stepanov erfunden und Anfang der 70er Jahre für die Silizium-Züchtung von Photovoltaik-Zellen in den USA wiederentdeckt. Saphir-Substrate sind so Form-flexibler und effizienter als mit dem Kyropoulos-Verfahren herzustellen, das Sägen der Waferscheiben entfällt entsprechend.

Viele der globalen Marktführer haben eigene Weiterentwicklungen der genannten Zuchtverfahren patentiert, die zum Ziel haben, bei kalkulierbaren Kosten, durch die komplette Beherrschung des Produktionsprozesses ein fast fehlerfreies Kristall für möglichst große Wafer-Durchmesser zu erzeugen.

4.1.2. Formung des Wafers

Schritt 2: Waferdurchmesser festlegen

Ist der Ingot / Boule fertig gezüchtet, wird er, falls die Kristallausrichtung stimmt, in eine Zylinderform abgedreht, alternativ werden bei anderer Kristallausrichtung kleinere Zylinderkerne seitlich heraus gebohrt. Je größer der Wafer im Durchmesser ist, desto mehr LED-Chips bzw. desto größere Chipstrukturen kann man in einem Schritt daraus fertigen. Aktuell liegt der gängigste Durchmesser noch bei 4 Inch / Zoll und wird sehr bald 6 Inch betragen.



Abbildung 4.7.: Ausgebohrter Kyropoulos-Boule

Mit jeder Vergrößerung des Wafer-Durchmessers wächst der technische Aufwand,

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

denn für Saphir-Züchtung und GaN-Aufzüchtung muss dann wieder in neue Maschinen und geänderte Produktions-Verfahren investiert werden. Regelmäßig erzielen nur die leistungsfähigsten LEDs mit der allerneuesten Technik die höchsten Preise am Markt, die eben vor allem daher rühren, dass die hohen Fixkosten für teure technische Investitionen in den Preis eingehen. Durch den Wettbewerbsdruck setzt aber i.d.R. sehr schnell der Preisverfall für State-Of-The-Art LEDs ein. Diese Dynamik treibt alle Beteiligten zu immer schnelleren Innovationszyklen. Die größten sind so für die neuesten Generationen von Hochleistungs-LEDs bestimmt. Für günstigere LEDs wird entsprechend auf die ältere Generation der 2 Inch Saphirwafer gesetzt, die auf eine einzelne LED heruntergerechnet, entsprechend bis zu 75 Prozent günstiger sein können.

Schritt 3: Wafer schneiden

Unter Beachtung der Kristallausrichtung wird der Wafer aus dem abgedrehten



Abbildung 4.8.: Polierter Saphir-Wafer Fa. Rubicon Technologies

Ingots bzw. dem Bohrkern mit Diamantsägen geschnitten. Seine Dicke beträgt dann 3-4 mm.

Schritt 4: Bearbeitungsrichtung festlegen

Anschließend wird der Wafer-Rand an einer Stelle in Form einer Kreis-Sehne abgeflacht, damit die Kreisscheibe ab sofort stets mit der gleichen Orientierung von den Maschinen bearbeitet werden kann.

Schritt 5: Randbearbeitung

Der Waferrand wird mit Fräsen abgerundet, so dass ein seitliches Einreißen der Scheibe aufgrund von Spannungen oder Belastungen verhindert wird.

4.1. Herstellung des Saphir-Wafers

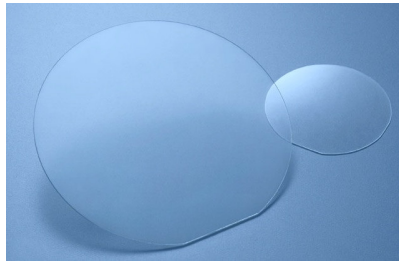


Abbildung 4.9.: Saphir-Wafer mit Abflachungs-Markierung

Schritt 6: Schleifen (Grinding)

Die sägerauhe Unter- und Oberseite wird anschließend durch Schleifen planiert.

Schritt 7: Läppen

Mit einem zweiten viel feineren Schleifschritt, den man fachbegrifflich Läppen nennt, erreicht man ebenfalls in einem Naßschleifverfahren mit einer Schleifpaste und mehreren Durchgängen, dass die Waferscheiben eine überall exakt gleiche Dicke von ca. 3 mm erhalten.

Schritt 8: Lasermarkierung

Daraufhin wird die Unterseite des Wafers als solche mit einem Laser markiert, denn sie wird vorerst nicht weiter behandelt.

Schritt 9: Finishing / Polishing

Die Oberseite wird nach dem Läppen z.B. durch noch feineres Polieren weiter behandelt. Mit welchen Verfahren genau das Ziel einer nahezu perfekten Oberfläche vom jeweiligen Saphir-Hersteller erreicht wird, bleibt oft sein spezielles Industriegeheimnis.

Für Hochleistungschips werden seit kurzem sogenannte Pattern, das sind sehr feine, die Benetzungsfläche vergrößernde, Strukturen auf der Waferoberseite, mittels Plasma-Ätzverfahren oder Laser für eine optimierte Haftung und Verwachsung der nächsten ersten Epitaxieschicht aufgebracht. Die Strukturen sind im Nano-Bereich, also winzig klein, sie haben einen Durchmesser von wenigen Tausendstel Millimetern

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

und daher mit bloßem Auge nicht auszumachen. Sie ähneln kleinen Kuppeln oder Kegelspitzen. Diese feinen Strukturen sorgen auch für einen besseren Lichtaustritt und ein besseres elektrisches Verhalten bei der nächsten aktiven GaN-Schicht. Die Saphir-Hersteller bieten diese „Pattern Sapphire Substrates“ (PSS) mit steigender Nachfrage an. Osram geht hier einen eigenen Weg. Statt Vertiefungen nachträglich abzutragen, wird vor dem Epitaxieren eine Glasschablone mit winzigen Löchern aufgelegt. Nur in den Löchern können dann die GaN-Kristalle als winzige Obelisk aufwachsen, der Rest der Oberfläche bleibt abgedeckt. Dieses patentierte Verfahren erreicht durch die besonders große Oberfläche und seitliche Austrittsmöglichkeit an den Kristalltürmen eine optimale Quanteneffizienz. Ob es sich gegenüber den abtragenden Verfahren behauptet bleibt abzuwarten.

Die Qualität des Saphir-Wafers hängt letztlich von seiner Kristall-Reinheit und Fehlerfreiheit hinsichtlich der Gitterstruktur, seiner gleichmäßigen Dicke, von seiner Oberflächengröße und der Güte seiner Oberflächen ab.

4.2. Epitaxie des Saphir-Wafers mit GaN

Schritt 10: Epitaxie mit der aktiven Schicht

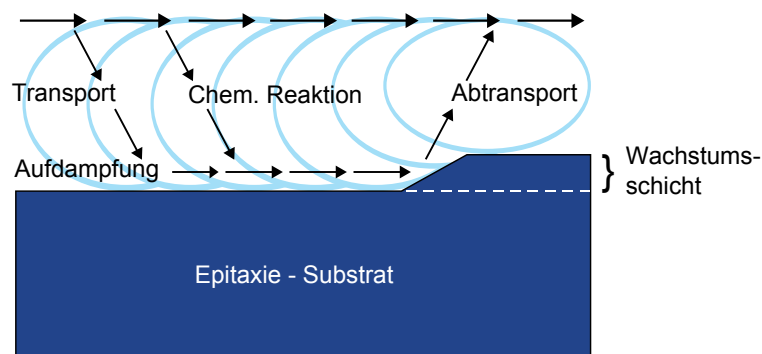


Abbildung 4.10.: Schema MOVPE-Epitaxie

Wenn der Saphir-Wafer fertig als Trägermaterial für die GaN-LED-Produktion vorbereitet ist, wird er vom LED-Hersteller erworben und mit dem optisch aktiven Gallium-Nitridsubstrat beschichtet. In manchen Fällen erfolgen vorbereitende Schritte, wie z.B. das eben genannte Pattern. Die technische Verfahrensweise, die den gleichmäßigen, fest verwachsenen Auftrag des aktiven Halbleiters GaN sicherstellt heißt „Epitaxieren“. Die Beherrschung dieses komplexen Verfahrens ist für die Qualität und Effizienz der LED essentiell.

4.2. Epitaxie des Saphir-Wafers mit GaN

Das derzeit gängigste Verfahren für die Epitaxie blauer LEDs und Laserdioden ist die Metallorganische Gasphasenepitaxie (MOVPE), eine Variante der Metallorganischen Chemischen Gasphasenabscheidung (MOCVD). Weitere LED-Epitaxieverfahren sind die Molekularstrahlepitaxie (MBE), die eine aufwändige Ultrahochvakuumtechnik erfordert und so immer nur einen oder wenige Wafer gleichzeitig prozessieren lässt, so wie die Hydridgasphasenepitaxie (HVPE), deren Epitaxieprozesse technisch noch relativ komplexer als MOVPE-Verfahren sind.



Abbildung 4.11.: MOCVD-Anlage Fa. AIXTRON

Beim MOVPE-Verfahren werden Gallium und Nitrid, vereinfacht ausgedrückt, in gasförmiger Form und unter Zuhilfenahme eines Inertgases (z.B. Stickstoff), auf dem erhitzten Saphir-Wafer abgeschieden. Im Prozess gestaltet sich insbesondere die Nitrid Abscheidung als aufwändig, es liegt im Gegensatz zum Gallium nicht molekular vor und deshalb entstehen in der mehrstufigen chemischen Reaktion Zwischenprodukte. Die dabei entstandenen Fremdatome wie z.B. Kohlenstoff führen unvermeidbar zu einer minimalen Verunreinigung des Substrats, was wiederum die Effizienz der LED im Vergleich zur wesentlich teureren Molekularstrahlepitaxie mindert. Insgesamt erweist sich das Verhältnis zwischen Ergebnis und Kosten mit dem derzeit überwiegenden MOCVD-Verfahren am günstigsten.

Im Reaktor werden Strömungs-, Druck- und Temperaturbedingungen exakt gemessen und berechnet, damit die stark gesättigten Transportgase für kontrollierte, hohe Abscheidungsraten sorgen können und die Aufwachsschicht des Halbleiters dennoch die definierten physikalischen Eigenschaften besitzt. Wie beim Saphirsubstrat kommt es auch beim Auftrag des GaN sehr auf eine hohe Gleichmäßigkeit der Schicht an. Mit rotierenden Wafern wird im Reaktor eine homogene Abscheidungsrate im Be-

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

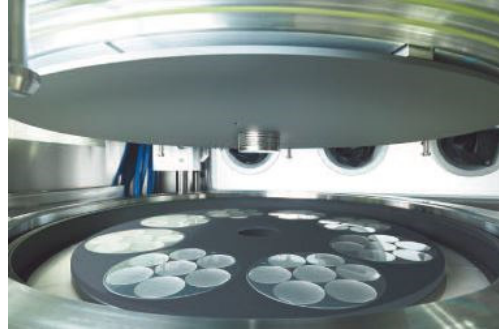


Abbildung 4.12.: Planetar-Reaktor in MOVPE-Anlage

reich von einem oder sehr wenigen Nanometern Schichtdicke unterstützt. Seit Asaki et al. wird zuerst immer eine primäre Nukleationsschicht bei niedrigeren Temperaturen aufgetragen. Sie dient als verbindender Puffer zwischen dem Saphirsubstrat und aktiven GaN-Substrat. Beide besitzen nämlich eine unterschiedliche Kristallgitterausrichtung, die eigentlich um 30 Grad bzgl. der C-Achse gedreht ist und durch das Epitaxieren auf die 001- Ebene des Saphir-Einkristalls die grundsätzliche Fehlanpassung der Gitterausrichtung auf 13, 8 Prozent verringert wird. Diese Vorgehensweise, man spricht von Vernetzung, bewirkt mit zunehmender Dicke immer weniger Verspannungen und sorgt damit auch für eine entsprechende Fehlerfreiheit beim GaN- Halbleiter.

(Zwischen-) Schritt 11: Aktive Zone epitaxieren mit InGaN

Bei allen sehr leistungsstarken GaN-LEDs wird an der Verbesserung der Lichtemission mit den verschiedensten Mitteln gearbeitet. Eine Möglichkeit, die Quanteneffizienz zu erhöhen ist der Einsatz von sogenannten Heterostrukturen in den Epitaxieschichten, das sind Doppel- oder Multiheterostrukturen (Vielfach-Doppelstrukturen). Damit entstehen sogenannte Quantentöpfe, die die Emission von Photonen wesentlich erleichtern.

Bei der Hetero-Struktur wird zwischen die mit Magnesium dotierte (Magnesiumquelle ist i.d.R. Biscyclopentadienylmagnesium) p-leitfähige und die mit Silizium (Quellmedium ist Silan bzw. Disilan) dotierte n-leitfähigen GaN-Epitaxie-Schicht eine nur ein Atom dicke Schicht aus dem InGaN-Halbleiter epitaxiert. Die Photonenemission findet in bzw. an der InGaN -/ GaN - Hetero-Grenzschicht, genannt Quantum-Well, als aktive Zone statt. Durch Variation des Indium-Anteils im InGaN kann die Bandbreite und somit Wellenlänge des emittierenden Lichts eingestellt

4.2. Epitaxie des Saphir-Wafers mit GaN

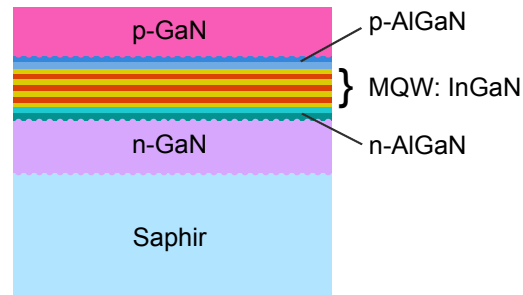


Abbildung 4.13.: Quantum Well in Aktiver Zone beim Flip-Chip

werden. Zur elektrischen Isolation ist nach der InGaN-Epitaxie noch eine dünne AlGaN-Epitaxie-Schicht notwendig. Bei Multiheterostrukturen (Multiple-Quantum-Well) erfolgt diese Vorgehensweise entsprechend mehrfach hintereinander.

Die Epitaxie der InGaN-Halbleiterschicht ist prozesstechnisch noch aufwändiger als die reine GaN-Aufdampfung, was den Preis für sehr effiziente LEDs nach oben treibt. Außerdem birgt die nötige Unterbrechung der jeweiligen unterschiedlichen Epitaxieprozesse neue Gefahren, wie z.B. das Potenzial für unerwünschte Verunreinigungen und Materialverspannungen. Die Schichtdicke einer Hetero-Epitaxieschicht beträgt unglaubliche 1 Nanometer (Millionstel mm), das wäre das gleiche Dickenverhältnis zum gesamten Wafer wie eine Schneeschicht mit 1 cm Dicke verteilt auf die ganze Fläche Deutschlands. Zum Vergleich: ein menschliches Haar ist ca. 50000 -100000 Nanometer dick.

Das GaN-Substrat hat wegen seines spezifischen Brechungsindex der Grenzfläche die optische Eigenschaft, dass nur Photonen, die mit einem spitzen Winkel auf die Grenzfläche zum Saphirsubstrat auftreffen, in diesen durchgelassen werden und so die LED sofort verlassen können. Alle anderen werden reflektiert und wieder absorbiert. Je nach Quanteneffizienz der aktiven Schicht, können einige oder auch viele Photonen wieder re-emittiert werden und erhalten so eine neue Chance, die LED zu verlassen. Um die Austrittsrate zu verbessern wird die Grenzschicht des GaN durch Patterning z.B. mittels Ätzverfahren (Nanosphere Lithography) oder Laserbehandlung wabenartig strukturiert, quasi gezielt rauer gemacht, damit sich so öfters ein spitzer Auftreffwinkel ergibt und die LED-Effizienz steigt.

Der Epitaxie-Prozess stellt den aufwändigsten, kompliziertesten und teuersten Schritt in der Prozesskette der LED-Fertigung dar. Daher wird mit Hochdruck

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

an neuen geeigneten Ausgangsmaterialien und Verfahrenstechniken geforscht, um die LED einerseits günstiger und andererseits noch effizienter und lichtstärker zu machen. Gute Chancen den theoretisch suboptimalen Saphir als Trägermaterial für den GaN-Halbleiter abzulösen werden derzeit dem Silizium-Carbid SiC zugesprochen, weil es günstiger ist und keine Gitterfehlpassung hervorruft. Eine technische Schwierigkeit besteht bei dieser Alternativtechnologie (GaN-on-Si) zum Saphir-Substrat darin, dass die bei der GaN-Epitaxie auftretenden hohen Schrumpfverspannungen zum SiC technisch in den Griff bekommen werden. Dem führenden amerikanischen LED-Hersteller Cree ist dies anscheinend gelungen, er bietet z.B. den 6" GaN-on-Si - Wafer seit Mitte 2012 auch für andere LED-Hersteller an. Auch weitere LED-Hersteller wie Toshiba setzen auf diese Technologie, da der Preisvorteil gegenüber dem teuren Saphir groß ist. Um die Lichteigenschaften in der aktiven Zone und den Übergang in die Lichtaustrittszonen zu optimieren, werden vermehrt Nano-Technologien eingesetzt, die mit relativ geringen Kosten eine höhere optische bzw. Quanteneffizienz bewirken können.

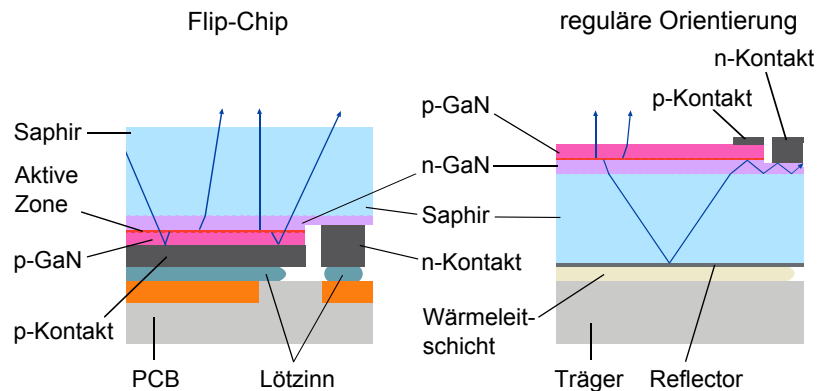


Abbildung 4.14.: Chip-Orientierung der LED

Die LED kann in zwei Orientierungen verbaut werden, die Epitaxieschicht nach oben oder unten gerichtet... In jüngster Zeit setzt sich die Flip-Chip-Version gegenüber der regulären Bauweise durch, bei der der LED Chip umgedreht verbaut wird, d.h. der Saphir oben liegt. Der große Vorteil ist der, dass keine störenden Bond-Drähte und Lötstellen dem Lichtaustritt im Weg stehen und somit die Effizienz der LED gesteigert wird. Je nach späterer Orientierung variieren dann die Schritte beim Kontaktieren und Ätzen.

Vor dem nächsten Schritt werden die Wafer z.T. vollautomatisch auf optische und elektrische Güte getestet.

4.3. Metallisierung / p-Kontaktierung

Schritt 12: Kontakte anbringen:

Auf die zuletzt epitaxiierte p-GaN-Schicht wird z.B. aus einer Gold-Nickel-Legierung ein optisch transparenter p-Kontakt aufgebracht. Beim Flip-Chip wird dazu die Legierung in einer Dicke von wenigen Nanometern auf die gesamte Fläche aufgedampft. Der flächige Kontakt bewirkt eine gleichmäßige Spannungsverteilung in der p-Schicht und bildet die Haftfläche für die danach angebrachten Kontaktverstärkungen zum Löten bzw. Bonden der einzelnen LEDs.

4.4. Strukturätzen

Schritt 13: Struktur herausätzen:

Auf dem Wafer muss noch die Segmentierung der einzelnen LEDs erfolgen, d.h. Festlegung der LED-Struktur in Zahl und Geometrie. Diese Einteilung geht mit der nötigen Freilegung von Schichten für das Anbringen der Kontakte auf den einzelnen LEDs einher. Mittels Lithografie wird eine Maske aus Schutzfilm aufgebracht, um die Bereiche zu schützen, die beim jeweiligen Ätzworgang nicht in Mitleidenschaft gezogen werden sollen. Trockenätzen (Dry-Etching) wird häufiger als Nassätzen (Wet-Etching) eingesetzt. Das Dry-Etching findet unter Vakuum mit ionisierten, reaktiven Gasen wie Sauerstoff oder Fluorkohlenwasserstoff statt.

Schritt 14: n-Kontaktierung

Nachdem der p-GaN-Film und ggf. die InGaN-Schicht an der Kontaktstelle z.B. mittels „Reaktivem Ionenätzen“ entfernt wird, kann der n-Kontakt aufgebracht werden. Er besteht aus einer vom p-Kontakt verschiedenen Legierung, z.B. aus einer Aluminium-Gold- oder Titanium-Aluminium-Legierung, damit der elektrisch bipolare Charakter der LED gewährleistet bleibt.

4.5. Vereinzeln der LEDs

Schritt 15: Ausdünnen des Saphirs

Die Dicke der Saphirscheibe beträgt bei der Epitaxie ca. 3mm. Für einige der noch folgenden Bearbeitungsschritte ist das zu viel, z.B. bei sehr kleinen LED-Dimensionen erweisen sich 3 mm als zu dick, sollten die Chips durch Brechen separiert werden. Wiederum erreicht man den Materialabtrag mit dem Lappverfahren in

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

mehreren Feinstufen. I.d.R. ist am Ende dann die Saphirdicke auf einen Millimeter reduziert.

Je nachdem, in welche Form die LED verbaut wird, erfolgen vor dem Vereinzeln der Chips eventuell noch weitere Schritte, z.B. ein Schutzüberzug-Verfahren namens Passivieren, wo Schutzschichten gegen Leckströme, zur Isolation und gegen Oxidation aufgebracht werden. Zwischen den unterschiedlichen Bearbeitungsvorgängen muss auch immer wieder gereinigt werden, was nasschemisch oder mittels Ultraschall erfolgt. Für bestimmte Chips werden auch teilweise schon Aufnahmen für das spätere Packaging geklebt, oder die leuchtaktive Phosphorschicht für weiße LEDs aufgebracht.

Schritt 16: Separieren der LEDs (Die singulation)

Auf einem Wafer sind je nach Größe von Chip und Wafer viele LEDs machbar. Bei sehr kleinen LEDs (0,2 mm) kann die Ausbeute für große Wafer schon mal von 7 bis 60 Tausend LED-Chips (Dies) pro Wafer betragen. Größere Chips/Dies, z.B. 2 mm und größer, wie sie für leistungsstarke LEDs gefertigt werden, sind entsprechend kostspieliger. Zwei Vorgehensweisen sind gängig, das Herausschneiden mit Diamantsägen, so wie das Anritzen mit einem Diamanten oder Hochleistungslaser und anschließende Ausbrechen der Chips. Sägen ist relativ unabhängig von der Saphir-Dicke, diese wirkt sich lediglich auf die Standzeit des sehr dünnen Sägeblattes aus, das flüssig-gekühlt wird um schädliche Erhitzung zu vermeiden. Herausbrechen ist Material-schonend, braucht aber eine gewisse Zeit und bietet sich nur für größer dimensionierte LED-Chips als Alternative an.

4.6. Verbau der LED (Packaging)

Schritt 17: Packaging

Es gibt verschiedene Bauformen bei LEDs, die durch den unterschiedlichen Verbau in Gehäusen oder auf Trägermaterialien bestimmt sind und sich nach dem späteren Einsatz bzw. Anwendungszweck richtet. Die nach dem Vereinzeln (noch) nicht eingehausten, jedoch schon voll funktionsfähigen Chips nennt man "Dies". So ein Die wird z.B. in eine Kupfersenke oder einen SMD (Surface Mounted Device) Chip eingebracht, der ohne Kontaktfüßchen auskommt und maschinell auf die Platine gelötet (gebondet) wird. Durch seine Flanken wird gleichzeitig der Lichtaustrittswinkel bestimmt.

Ein Teil der LED-Hersteller bietet die zum Lötten fertige LED in unterschiedli-

4.7. Aus Blau und Gelb mach weiß: Die Rolle des Phosphors

chen Gehäuseformen an, andere produzieren lediglich die unverbaute LED. Große LED-Packager, die selbst keine Epitaxie fahren, kaufen entsprechend den LED-Chip bzw. Wafer und verarbeiten ihn dann zu verschiedenen Bau-Typen wie SMD-, SMT-, COB-Chips etc. weiter und/oder sorgen oft für die Phosphorbeschichtung. In allen Fällen erfolgen diese Verarbeitungsschritte vollautomatisch.

Wie groß ist die kleine LED eigentlich? Die Größe der LED ist stets kleiner als die Bauform bzw. das Gehäuse, in der sie sitzt. Beim sogenannten CSP-Chip, CSP steht für Chip-Scale Package, macht die Fläche des gehäuses z.B. mindestens 80 Prozent des Gehäuses aus. Das kann mit Flip-Chip-Montage wie auch mit der WLCSP-Methode erreicht werden, wo der Die mit Schutzüberzug gegen Lichtaustritt und Kontaktstrom gesichert wird. In neuester Zeit sind die CSP-Chips vor allem im Mid-Power Segment beliebt.

LEDs werden in diversen Standard-Größen angeboten. Der kleinste bunte LED-Chip hat die Fläche von $205 \times 205 \times 260 - 307 \mu\text{m}$ ($0,2 \times 0,2 \text{ mm}$) und wird z.B. in den kleinsten 2-Pin-LEDs mit Epoxidharz- Linse für Signalzwecke verbaut. Die kleinste weiße LED in 2014 auf dem Markt hat Toshiba, der gehäute Chip hat eine Dimension von $0,65 \times 0,65 \text{ mm}$. 3535 ist z.B. eine Standardgröße für Mid-Power-Chips. Ein 5050 SMD-Chip ($5 \times 5 \text{ mm}$) z.B. enthält meist drei oder mehr einzelne LEDs gleichzeitig verbaut. High-Power SMD-Chips für weiße LEDs sind z.B. $2,8 \times 0,85 \times 0,5 \text{ mm}$ oder $4,5 \times 1,6 \times 0,8 \text{ mm}$ groß und werden oft gruppiert verbaut. Von der Größe eines SMD-Chips lässt sich in etwa auf seine Wattleistung schließen. Mit der COB-Technik (Chip-On-Board) gelingen sehr hohe Leistungsdichten (lm/W), da viele Dies ohne Gehäuse nebeneinander direkt auf eine Aluplatte geklebt werden. Mikrodrähte verbinden die einzelnen Chips mit der Platine. Der Phosphor wird hier hinterher über die gesamte Fläche aufgebracht.

In den meisten Fällen erfolgt nach dem Vereinzeln der Schritt, der aus der blauen LED erst eine weiße LED macht, das Aufbringen des lichtaktiven Phosphors.

4.7. Aus Blau und Gelb mach weiß: Die Rolle des Phosphors

Das physikalische Prinzip der additiven Farbmischung führt, wie gesagt, mit RGB-LEDs nicht zu überzeugenden Ergebnissen hinsichtlich der weißen Lichtfarbe. Der Weg, für Zwecke der Allgemeinbeleuchtung mit UV-LEDs und dem von Leuchtstofflampen her schon eingesetzten Triphosphor-Verfahren zu arbeiten, wurde sehr bald wegen der relativ geringen Effizienz nicht weiter verfolgt. Es lag also nahe, an den fluoreszierenden Phosphoren weiter zu forschen, damit man in die Lage kommt, Blaulicht hoch-effizient in weißes Licht zu konvertieren. Warum wurde ausgerechnet auf die blaue LED gesetzt und nicht auf eine rote oder grüne LED, die man mit ent-

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

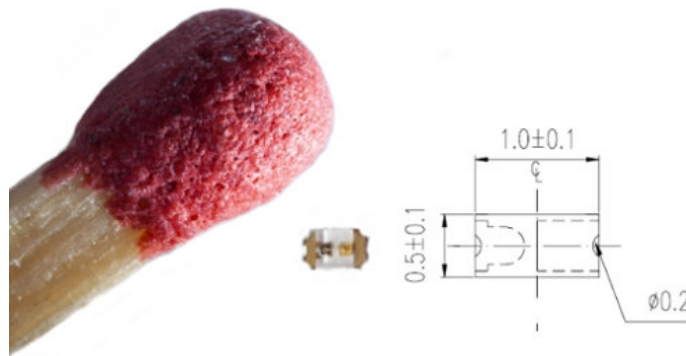
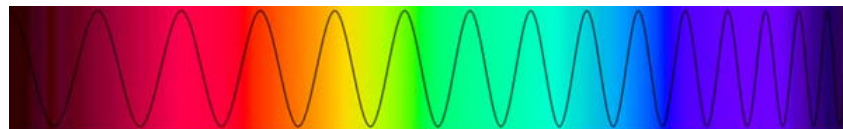


Abbildung 4.15.: 0202 SMT-Chip-LED im Vergleich ein Winzling..

sprechenden Phosphoren theoretisch auch zur Weißlichterzeugung bringen könnte? Das hat insbesondere mit dem reziproken Zusammenhang zwischen Energie und Wellenlänge zu tun: Je kleiner die Wellenlänge, desto größer das Energieniveau. Blaues Licht ist kurzwelliger als Grünlicht oder noch langwelligeres Rotlicht und daher energiereicher.



Zusammenhang zwischen Wellenlänge und für uns sichtbarer Lichtfarbe

Abbildung 4.16.: Lichtfarbe und Wellenlänge

Lichtfarbe	Wellenlänge (nm)	Frequenz (THz)	Energie (kJ:Mol-Photons)
Rot	770 - 640	390 - 470	156 - 187
Orange	640 - 600	470 - 500	188 - 200
Gelb	600 - 570	500 - 530	201 - 212
Grün	570 - 490	530 - 610	213 - 243
Blau	490 - 460	610 - 650	244 - 259
Violett	460 - 390	650 - 770	260 - 307

Die Aufgabenstellung war deshalb, aus dem monochromatischen, energiereichen

4.7. Aus Blau und Gelb mach weiß: Die Rolle des Phosphors

Licht der blauen GaN-LED ein reiches Farb-Spektrum zu erzeugen, das vom menschlichen Auge als weiß wahrgenommen wird und mindestens so gut, oder eher besser in seiner Farbwiedergabe ausfallen sollte, wie dies gute Leuchtstofflampen schaffen. Diese Forschungsbemühungen sind, wie man heute sehen kann, sehr erfolgreich gewesen und spielen eine entscheidende Rolle für den Erfolg der GaN-LEDs, da diese mit modernen Phosphoren inzwischen sowohl sehr Energie-effizient konvertieren, als auch qualitativ gutes Licht erzeugen können. Wegen dieser Schlüsselstellung wurden große Bemühungen der Hersteller bzgl. des IP-Schutzes (Intellectual Property) geleistet und viele Patente im Phosphor-Bereich angemeldet. Dieses Verhalten hat wiederum zur Entwicklung immer neuer Phosphore und deren Einsatztechniken geführt, um Lizenzgebühren resp. Patentverletzungsklagen zu verhindern.

Nachdem es für kurze Zeit sogar nach einem ausufernden Patentkrieg ausgesehen hatte, sind alle bedeutenden Hersteller inzwischen dazu übergegangen, gegenseitige Lizenz-Nutzungsvereinbarungen zu treffen, sogenanntes Cross-licensing, um die jeweils für die spezifische Applikation entwickelte LED mit dem dafür idealen Phosphor auszustatten. Das amerikanische Unternehmen Intematix ging ab 2007 den Weg, ausschließlich an lizenzfreien Phosphor, zunächst auf Silikatbasis zu forschen und mit neuen Materialien eigene patentierte Phosphor-Substrate und Techniken zu entwickeln, um jene dann den LED-CHIP-Packagern (LED-Hersteller, die z.B. nicht die volle LED-Prozesskette abbilden) gewinnbringend zur Verfügung zu stellen. Ein weiterer gewichtiger Grund für die Vielzahl neuer Phosphor-Stoffe liegt darin, dass gängige Phosphore meist aus relativ teuren, chemischen Elementen bestehen, den sogenannten Seltenen Erden. Seltene Erden werden vor allem im Gebiet von China gefunden, was Wettbewerbspreise verhindert. Verteuert sich eines dieser Elemente wegen der großen Nachfrage für die Halbleiterindustrie signifikant, wird entsprechend intensiv nach einer kostengünstigeren Alternative gesucht.

Folgende Unternehmen sind mit Patenten am Phosphor-Markt dominant: Mitsubishi, Osram, Philips Lumileds, Nichia, sowie die Partizipanten des BOSE-Konsortiums: Toyoda Gosei, Tridonic Atco, Litec und Lumileds, die sich ihre Patentrechte teilen. Cree hält bei Remote Phosphor Patente, die teilweise mit Intematix und Lumileds cross-lizenziert sind.

Mit Phosphor bezeichnet man sogenannte Fluorophore, auch Luminophore genannt, das sind Fluoreszenz-Farbstoffe verschiedenster chemischer Zusammensetzung, häufig aus den Selten-Erd-Metallen gewonnen. Die Metall-Nichtmetall-Verbindungen werden mit einem Aktivator dotiert (= Donator), z.B. dem chemischen Element Europium (Eu), einem silbrigen Schwermetall der Lanthanoid-Gruppe (Seltene Erden), um verschieden farbige Phosphore zu bekommen. Der angloamerikanische

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

Begriff „Phosphor“ sollte aber nicht mit dem chemischen Element Phosphor (P) gleichgesetzt bzw. vermischt werden, das natürlich schon für die Namensgebung aufgrund seiner (Chemie-)Lumineszenz-Eigenschaften Pate stand und im Englischen Phosphorus heißt.

Wie funktioniert das Prinzip Fluoreszenz? Der fluoreszierende Stoff wird durch optische Energie (elektromagnetische Strahlung = Licht), d.h. Absorption eines auftreffenden Photons selbst zur Abgabe eines eigenen Photons mit unterschiedlicher Qualität (Spin,...) angeregt. Wegen des Energieerhaltungssatzes kann unter Berücksichtigung der Verlustenergie die Energie des emittierten Lichts (Photons) nur kleiner sein, als die Energie des absorbierten Lichts (eine Erwärmung des Fluorophors erfolgt dementsprechend!) Das bedeutet wiederum, dass die Wellenlänge des emittierten Lichts größer sein muss, als die des absorbierten Lichts, was farblich gesehen zu einer Rot-Verschiebung führt. Die Dauer der Lichtemission liegt bei der Fluoreszenz im ultrakurzen Nano-Sekunden-Bereich. Bei Lumineszenz-Vorgängen, die länger dauern spricht man statt von Fluoreszenz entsprechend von Phosphoreszenz, der Lumineszenzfarbstoff leuchtet hier eine bestimmte Zeit nach der Lichtabgabe nach.

Aber: Sollte eine LED nachleuchten, liegt das nicht an deren Phosphoreszenz-Eigenschaften. Der Effekt entsteht, weil aufgrund der kapazitiven Natur ihrer elektrischen Ansteuerung (u.a. mit Kondensatoren), die Strom-Spannung zeitverzögert abgebaut wird, also nach dem Ausschalten der Spannung noch etwas Strom nachfließt.

Folgende Phosphore können chemisch gruppiert werden:

Gruppe	Phosphor
(gelbe u. grüne) Sulfide	z.B. $\text{CaGa}_2\text{S}_4\text{:Eu}$, $\text{CaAl}_2\text{S}_4\text{:Eu}$, $\text{SrGa}_2\text{S}_4\text{:Eu}$
Silikate	z.B. $\text{Ba}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7\text{:Eu}$, $\text{M}_2\text{SiO}_4\text{:Eu}$
Garnets/Neosilikate (YAG/TAG)	z.B. $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}\text{:Ce}$
(grüne) Aluminate	z.B. $\text{BaAl}_{12}\text{O}_{19}\text{:Mn}$
(rote) Nitride	z.B. $\text{CaAlSiN}_3\text{:Eu}$
(grüne u. rote) Oxinitride	z.B. $\text{Sr}_5\text{Al}_5+\text{OSi}_{21}\text{-ON}_{35}\text{-OO}_2+\text{O :Eu}$
Quantum Dots	z.B. CdSe

4.7.1. Entwicklung der Phosphore / Luminophore

Historisch gesehen wurden zuerst die LED-Phosphore aus der YAG-Gruppe (Y, Al u. Gd- Verbindungen), alle sind Ce-dotiert, 1997 von Nichia für die erste weiße LED mit Patentschutz eingesetzt. Inzwischen läuft der Patentschutz für einige YAG-Verbindungen aus. Mit diesen Farbstoffen waren wegen des Mangels an spektralem Rot-Anteil lediglich typische CRI- Indizi (Farbtreue-Werte) von 60- 75 CRI erreichbar. Wegen höherer Ansprüche entwickelte man als direkten Technologie-Nachfolger die TAG-Gruppe, Y₃ wurde durch Tb₃ ersetzt. Osram war hier der maßgebliche Entwickler, inzwischen hält auch Nichia TAG-Patente. Der Rohstoffpreis für Tb hat sich seither durch Verknappung vervielfacht, ein neuer Ansporn, neue Lumineszenzstoffe auf anderer Basis zu entwickeln. Philips ging gleich einen anderen Weg und kombinierte die Phosphor der YAG-Gruppe mit Sulfiden. Sulfide sind aber relativ empfindlich gegen hohe Temperaturen und weisen auch eine Empfindlichkeit für hohe Luftfeuchtigkeit auf.

Die Gruppe der mit Eu dotierten Silikate, als Alternative zur YAG/TAG-Dominanz, ist die Phosphor-Patent - Grundlage der Unternehmen aus dem BOSE-Konsortium zu dem 2010 auch Intematix als jüngstes Mitglied dazukam und wird auch in Teilen von Osram und Mitsubishi patentiert. Ab ca. 2009 patentierte und kommerzialisierte Mitsubishi Chemicals viele Phosphore im Bereich der Nitride und Oxinitride. Letztgenannte in roter und grüner Ausführung spielen aktuell und wohl auch noch in nächster Zukunft zahlenmäßig die größte Rolle am LED-Markt. Seit ca. 2011 sind deshalb auch große LED-Unternehmen wie Samsung, LG Innotek, Epistar oder Everlight durch Abkommen an der Nutzung und Weiterentwicklung des Phosphor-Know-hows beteiligt und sichern sich auf diese Weise den Produkterfolg der eigenen LEDs. Chinesische LED-Hersteller, die seit 2011 eine immer größere Rolle am Gesamtmarkt haben, forschen selbst zwar auch, aber eher zu einem relativ geringen Teil, da sie auch eher selten hochwertigste LEDs neuester Technik produzieren. Teilweise werden Lizenzgebühren an die vorgenannten Mitbewerber gezahlt, teilweise wird das IP wohl schlicht ignoriert, da effektive Sanktionen mangels Schwächen der lokalen Gerichtsbarkeit kaum zu erlangen sind und Importverbote regelmäßig zu spät kommen.

Wie die junge Geschichte gezeigt hat, ist die Technologie insgesamt sehr dynamisch aktiv und Patente sichern keinen oder vielleicht nur einen kurzen technologischen Vorsprung. Die junge Quantum Dots Technologie, ein Kind von Nass-Chemie und Nano-Forschung, ist beispielhaft für diesen rasanten Technologiewandel und bringt wieder neue Player am Phosphormarkt, wie Nanosys oder QD Vision, ins Spiel. Die Quantum-Dot Technologie, die den Vorteil hat, dass mit einer Technologie das

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

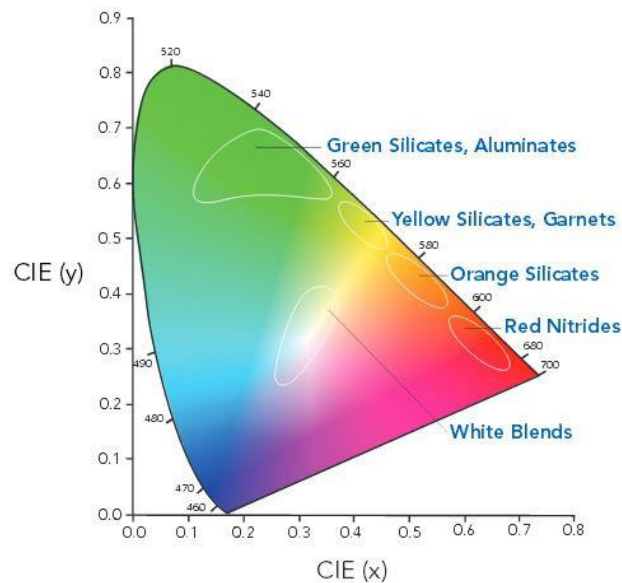


Abbildung 4.17.: Phosphorportfolio Fa. Intematix dargestellt auf CIE-Farbskala

komplette Spektrum erreicht werden kann, wird derzeit fast ausschließlich in der Remote-Anordnung verwendet, da sie (noch) nicht hitzestabil ist.

Die Herausforderungen bei Phosphoren sind vielfältig:

Der Phosphor soll sehr quanteneffizient sein, das heißt viel Licht abstrahlen. Das hängt von den chemisch-optophysikalischen Eigenschaften und auch Parametern wie Schichtdicke und Partikel-Verteilungs-Homogenität der Phosphor-Schicht ab. Beide Eigenschaften wirken sich auch auf die Anzahl der im Phosphor konvertierten/emittierten Photonen aus. Einerseits wird bei relativ längerer Wegstrecke des Blaulichts durch den Phosphor mehr weißes Licht emittiert, da die Wahrscheinlichkeit steigt, dass das Blaulicht statt ungehindert zwischen den Molekülen zu diffundieren, mit einem Phosphor zusammentrifft. Andererseits kann das vom Phosphor emittierte Licht aber auch bei längerer Wegstrecke vom eigenen Stoff wieder absorbiert werden, weil es den direkten Weg nach außen nicht findet. Die je nach Winkel des Auftreffens resultierenden leicht unterschiedlichen Farbemissionen werden in der Mehrzahl als nachteilig bewertet. Sollte für die spezifische LED-Anwendung ein reicheres Farbspektrum zuträglich sein, wäre es kein Problem.

4.7. Aus Blau und Gelb mach weiß: Die Rolle des Phosphors

Oft wird es aber dann zu einem, wenn ein sehr enges, kontrolliertes Spektrum, wie z.B. hochwertiges Displays dies benötigen, erreicht werden soll. Die nicht zu vermeidende Rate an zurück reflektierten Photonen muss hier selbstredend so gering wie möglich ausfallen. Nicht zuletzt ist auch die Stabilität des Phosphors, z.B. gute Hitzeverträglichkeit, Unempfindlichkeit gegen hohe Luftfeuchte, Abriebfestigkeit, etc. für eine lange Lebensdauer ohne signifikanten Effizienzverlust gefordert.

Je nach Bestimmung der LED für ihre zukünftige Anwendung wird ein dafür optimales Emissionsspektrum durch geeignete Phosphore und einem vertretbarem Aufwand bzw. unter Kostenminimierung angestrebt. Kostentreiber, wie verknappede Seltene Erden oder Lizenzgebühren aufgrund IP-Schutzes, mindern entsprechend den Erlös für die LED.

Schritt 18: Phosphor aufbringen

4.7.2. Kontakt-Phosphor

In vielen Fällen wird die Phosphor-Schicht direkt auf die LED aufgebracht. Bei normaler Orientierung auf die GaN-Seite, bzw. die sich darüber befindliche Kontaktschicht, beim Flip-Chip auf den Saphir. Das geschieht z.B. mit flüssigen Suspensionen, die auf den Wafer oder den verbauten Chip aufgetragen werden. Beim Betrachten einer LED fällt die typisch gelbe Farbe der Phosphor-Schicht auf, die bei warm-weißen Lichtfarben der LED ins Orange, bei kalt-weißen LEDs ins Gelbgrünliche gehen kann, je nach Anteilen von roten oder grünen Phosphoren.



Abbildung 4.18.: 5050-SMD-Chip mit Phosphorbeschichtung

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

4.7.3. Remote-Phosphor

Der Phosphor kann sich, sofern das bautechnisch möglich ist, in relativer Entfernung vom Chip befinden, daher sein Name. Die Phosphor-Schicht muss dabei nicht unbedingt eben-flächig, sie kann auch gewölbt sein, wenn das für die Lampe sinnvoll ist.



Abbildung 4.19.: Remote Phosphor in flächiger und runder Form

Die ursprüngliche Idee der Erfinder dahinter war die, dass man durch den Abstand zur LED die Absorptionsrate der vom Phosphor emittierten Photonen so deutlich vermindern, die gesamte Austrittsrate / Quanteneffizienz erhöhen könne. Bis jetzt konnte zwar kein Nachweis erbracht werden, dass dem so sei, es gibt aber andere, naheliegende Vorteile dieser Technik. So darf z.B. die Hitzebeständigkeit des Phosphor durch die relativ höhere Entfernung zum Chip entsprechend auch relativ geringer sein, was weitere hitzeempfindliche Phosphormaterialien wie Quantum-Dots zulässt.

Ein weiterer, zumindest theoretischer Vorteil für die Praxis ist der, dass der Lampenhersteller unabhängig vom Chiphersteller den Remote Phosphor quasi als modularen Baustein auswählen kann. Infolge der Distanz zur LED steigt tatsächlich auch ihr Wirkungsgrad dadurch, dass bei der Lichtkonversion im Phosphor Konversionswärme entsteht, die bei direktem Chipkontakt dessen Wärmebilanz entsprechend mit erhöht. Aus demselben Grund können Remote Phosphore aber bei sehr starken Powerchips nicht eingesetzt werden, da der Phosphor ohne Kontakt mit dem Chip und somit indirekt mit dessen Kühlkörper, seine eigene Wärme selbst nicht mehr genügend ableiten kann.

4.8. Lichteigenschaften, Lichtwerte und Bedeutung

Bevor wir uns dem letzten bedeutenden Schritt bei der Herstellung der weißen LED zuwenden, dem wichtigen Binning, betrachten wir die Parameter bzw. Einheiten, mit denen vergleichbare Aussagen quantitativer und teilweise qualitativer Art über

4.8. *Lichteigenschaften, Lichtwerte und Bedeutung*

das emittierte bzw. von unseren Augen empfangene und von uns bewertete Licht gemacht werden.

4.8.1. Licht als relative Erscheinung, als Empfindung

Für uns Sehende sind Phänomene wie Lichtwahrnehmung und Farbempfinden was ganz Alltägliches einerseits und etwas ganz Wichtiges andererseits. Wir sind für Tageslicht geschaffen, unsere Biologie hat sich in vielen Tausenden Jahren auf das halbtägliche Sonnenlicht eingestellt, mit dessen Hilfe wir uns in unserer Lebenswelt gut zurechtfinden und bewegen können. Das Prinzip Farbsehen ist dafür genauso wie z.B. auch die Umriß- oder Texturerkennung unseres Gehirns von entscheidender Bedeutung für das Erkennen und Einordnen von Dingen. Mit Hilfe des künstlichen Lichts hat sich der Mensch, seit seiner Macht über das Feuer, seinen Aktionsradius räumlich und zeitlich erweitern können. Besitzt das Kunstlicht dabei ähnliche Qualitäten wie das Sonnenlicht, kann unser Sehapparat damit besonders leicht umgehen. Wenn das Kunstlicht wenigstens ähnlich aussieht wie Feuer oder Kerzenlicht, sind wir dank jahrtausend langer Prägung schon ganz zufrieden damit. Wir müssen uns aber klar machen, dass das Phänomen Licht wirklich sehr relativ ist, weil relativ zu unserer biologischen, individuell unterschiedlichen Ausstattung.

Das, was wir mit Licht bezeichnen, ist der kleine Anteil der elektromagnetischen Strahlung, den unser menschliches Auge mit Hilfe von zwei Netzhautstrukturen, genannt Stäbchen und Zapfen, aus der Reststrahlung herausgefiltert aufnehmen kann und der dann vom Auge als Sinnesempfindung, in elektrische Impulse kodiert, an unser Gehirn gesendet wird. Zapfen sprechen auf unterschiedliche Wellenlängen des Lichts an, die Stäbchen sind für Helligkeitsabstufungen zuständig. Es existieren 3 Bauarten von Zapfen, die auf Wellenlängen im roten, grünen oder blauen Bereich ansprechen und so den Eindruck des Farbmischungsverhältnisses ans Gehirn senden können. Neben der Fähigkeit, diese bunten Farben wahrzunehmen können wir damit auch unbunte Farben erkennen, grau bei gleicher aber insgesamt schwacher Intensität aller 3 Zapfenarten, weiß bei voller Intensität aller 3 Zapfenarten und schwarz bei fehlendem Reiz an Zapfen und Stäbchen. Erst im Zentralen Nervensystem entsteht so etwas wie Farbe oder Helligkeit als dekodierte und bewertete Nachricht des Auges, als menschliche Empfindung. Insbesondere beim Farbsehen kann man die Relativität zeigen: Die Nacht verändert unsere Wahrnehmung der Farben gewaltig, wie das Sprichwort beweist: alle Katzen werden grau... Tatsächlich kommt es bei wenig Licht zu einer Verschiebung der Farbempfindlichkeit Richtung des blauen Spektralbereichs, worunter alle Farben bis auf Blau leiden.

Tiere sehen je nach Aufbau ihres Auges keine oder ganz andere Farben als wir. Und

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

so mancher Mensch, dem eine Farbenblindheit attestiert wurde, hat tatsächlich Schwierigkeiten, Rot und Grün so zu erkennen, wie es für die meisten normal ist. Im Alter ändert sich zusätzlich die Sehfähigkeit, was mit degenerativen Entwicklungen unserer Biologie zusammenhängt. Schließlich wird Farbe von uns wie die Mehrzahl andere Ding-Eigenschaften auch mit einer Qualität verknüpft, sie wird individuell, auch unter Einfluss des kulturellen Umfelds bewertet. Südländer und Asiaten z.B. kaufen eher Lampen mit relativ kälteren Lichtfarben als Nordländer, die sich vielleicht einfach nach der Sonne des Südens sehnen. Unser Verstand bestimmt also mit was wir wie sehen. Ein weiteres Beispiel: Warum erscheint uns die reife Tomate sogar dann noch als kräftig rot, wenn es schon dunkelt? Mit dem Wissen, dass die Tomate rot ist, wird der aktuelle Sinneseindruck (grau-rot) überlagert und deshalb verstärkt.

4.8.2. Spektralbereich

Unser Auge kann Farben in einem Wellenbereich von ca. 380 bis 780 Nanometer wahrnehmen. Dies geschieht aber nicht in proportionaler Qualität, also gleich großen/kleinen Schritten, sondern mit unterschiedlicher Empfindlichkeit und in Abhängigkeit der Helligkeit. Bei einer Wellenlänge von ca. 555 nm (gelbgrün) besteht die größte Farb-Empfindlichkeit, bis 400 nm und ab 750 nm ist sie am geringsten. Das bedeutet, wir können wesentlich mehr Farbabstufungen bei gelben und grünen Farbtönen wahrnehmen, als uns dies entsprechend für rote oder blaue Töne gelingt, immer vorausgesetzt es ist auch hell genug.

4.8.2.1. Angabe der Wellenlänge für bunte LEDs

Farbe	Wellenlänge in nm	Frequenz in THz
 rot	≈ 700 - 630	≈ 430 - 476
 orange	≈ 630 - 580	≈ 476 - 517
 gelb	≈ 580 - 560	≈ 517 - 535
 grün	≈ 560 - 480	≈ 535 - 624
 blau	≈ 480 - 420	≈ 624 - 714
 violett	≈ 420 - 390	≈ 714 - 769

Abbildung 4.20.: Wellenlängen und Frequenzen von Lichtfarben

Jede buntfarbige LED sendet unter konstanten Bedingungen eine bestimmte Wellenlänge aus, die wir als einheitlich farbig wahrnehmen. Da die LED aber praktisch nie unter den gleichen Bedingungen wie Temperatur etc. betrieben wird, und

4.8. Lichteigenschaften, Lichtwerte und Bedeutung

zwischen den LEDs leichte Unterschiede bestehen, geben die Hersteller nach dem Binning eine sog. Dominante Wellenlänge, ausgedrückt in Nanometern (nm) an, um deren Wert sich die tatsächlich emittierte Strahlung befindet.

1931 hat die CIE (Internationale Gesellschaft für Beleuchtung) aus den Erkenntnissen verschiedener empirischer Untersuchungen mit vielen teilnehmenden Menschen den theoretisch möglichen Farbraum als das Innere einer nach links geneigten Parabel dargestellt, die sogenannte CIE-Normfarbtafel, die auch heute noch überall ihre Anwendung findet.

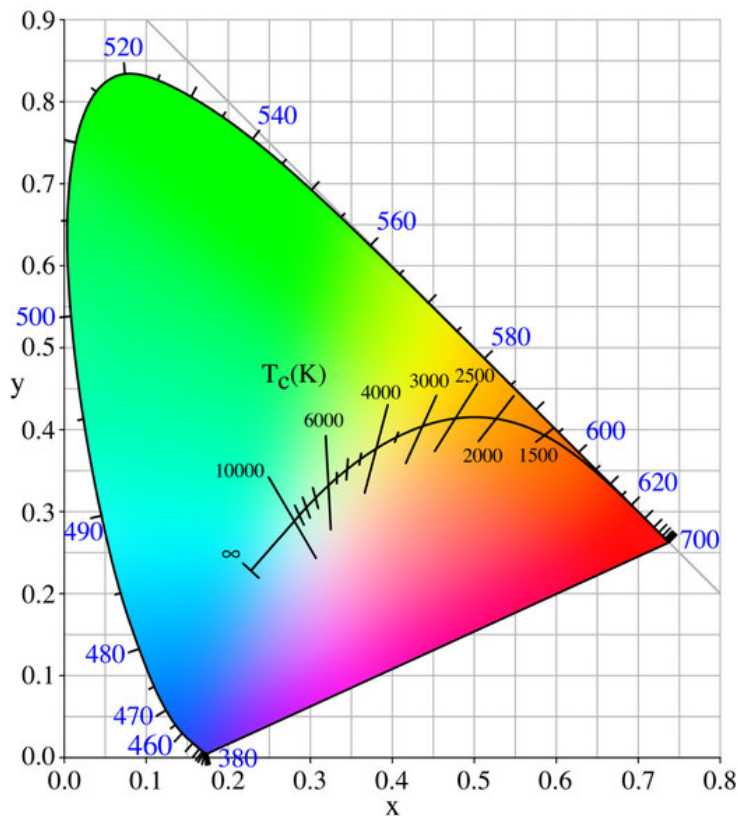


Abbildung 4.21.: CIE-Normfarbskala

Zur Vereinfachung und übersichtlicheren Darstellung des Farbraumes aus den drei Grundfarben Rot, Blau und Grün, wird statt einer dreidimensionalen Darstellung eine zweidimensionale Fläche hergenommen. Der X- und Y- Wert einer beliebigen Mischfarbe kann in der Grafik direkt abgelesen werden, der dritte Z-Wert muss

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

über die Eigenschaft $x+y+z = 1$ errechnet werden, beträgt also den resultierenden Differenzwert zu eins. In diesem Farb-Raum ist der äußere Bereich Richtung Parabellinien und Grundlinie von reinen monochromatischen, gesättigten Farben bestimmt, im Inneren finden sich immer mehr weiß und Grauantteile.

Jede Farbe lässt sich so als Farbort mit seinen Tupelwerten x und y (u. z) darstellen. Zur Bestimmung der Helligkeitsangabe bräuchte es eigentlich noch einen weiteren h -Wert in einer dreidimensionalen Darstellung (man könnte sich auch eine Wölbung über der Diagrammfläche dazu vorstellen). Darauf wird aber regelmäßig verzichtet. Wem auffällt, dass es z.B. auch keine Brauntöne gibt, sei gesagt, dass dieses System nur für additive Farbmischung geeignet ist, wie sie bei Lichtfarben und nicht bei Malfarben (Subtraktive Farbmischung) erfolgt. Braun ist bei Lichtfarben (Vgl. Farb-Monitor) ein orangeroter Mischton mit relativ geringer Leuchtkraft.

4.8.2.2. Farbtemperaturbestimmung bei weißen LEDs

Im Gegensatz zu den buntfarbigen LEDs kann für das polychromatisches Licht der weißen LED keine eindeutige Wellenlänge angegeben werden. Bei Leuchtstofflampen gibt die Industrie eine Einteilung in Farbwärmewerte an und benennt diese mit dreistelligen Zahlen. Diese Zahlen entsprechen einer Grobeinteilung in warm-weißes, neutral-weißes und kalt-weißes Licht, die auch bei LEDs als Lampen-Hersteller--Angabe breite Verwendung findet. Überraschenderweise sind die Grenzen bei der Zuordnung zur entsprechenden Farbtemperatur je nach Standardisierungsstelle verschieden gesetzt. Um feinere Unterscheidungen anzugeben, ermittelt man deshalb die Farbtemperatur und gibt sie in der physikalischen Temperatureinheit Kelvin an. Warum Temperatur? Unterschiedliche Wellenlängen des Lichts besitzen jeweils ein unterschiedlich großes energetisches Potential. Drastisches Beispiel dafür ist die Mikrowelle, sie ist so energiereich, dass sie Speisen erwärmen kann. Addiert man die Energiepotentiale der einzelnen Wellenlängen erhält man eine brauchbare Aussage, die auch unseren Sprachgebrauch, z.B. von warmen Farben, widerspiegelt. So hat z.B. Sonnenlicht bei blauem Himmel kurz vor und kurz nach Mittag (Sonnenstand bei 30 Grad) eine Lichttemperatur von ca. 5500K, am frühen Vormittag oder späten Nachmittag (Sonnenstand bei 60 Grad) ca. bis 6500 K, Kerzenlicht liegt bei ca. 2700 K.

Je nach Beschaffenheit der Phosphorschicht, lässt diese mehr Blaulicht durch und emittiert je nach Verwendung bestimmter Phosphore ein Bündel unterschiedlicher Farbtemperaturen.

Der LED-Anwender wird vielleicht schon festgestellt haben, dass jeweils gleiche Farbtemperaturen dennoch unterschiedliche Farbeindrücke hinterlassen können.

4.8. Lichteigenschaften, Lichtwerte und Bedeutung

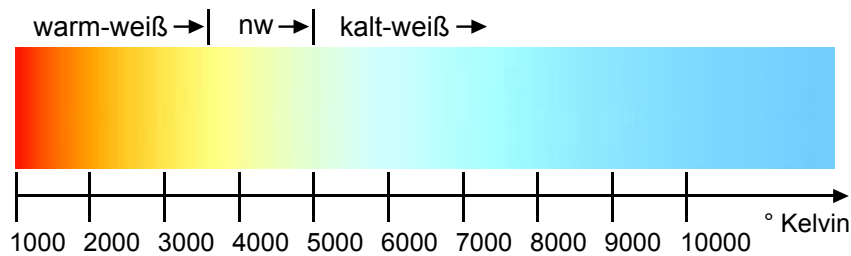


Abbildung 4.22.: Farbtemperatur in Kelvin, Grobeinteilung in warm-weiß (ww), neutral-weiß (nw) u. kalt-weiß (kw)

So ändert sich z.B. auch bei der ein und derselben LED je nach Intensität des Stromdurchflusses, sprich elektrischer Untersteuerung oder Übersteuerung, oder je nach LED-Temperaturänderung aus anderen Gründen die Lichtfarbe mit einer Verschiebung ins Rote oder Grüne. Gerade die Herstellung von sehr warmen Lichtfarben bzw. Farbtemperaturen ist schwierig, da die grundsätzliche Verschiebung in den Rotbereich einen vielleicht zu deutlichen Rot- oder Gelbstich, je nach verwendetem Phosphor hervorrufen kann.

Weil die Farben der von der LED angestrahlten Gegenständen nur eine reflektive Reaktion ihrer Oberflächen auf die auftreffenden Lichtwellen sind, erscheinen uns die Farben je nach Lichtspektrum des Lichts als deutlich unterschiedlich. Diese Veränderung gegenüber den Farben des natürlich Lichts oder Kerzenlichts bezeichnet man als Farbtreue bzw. Farbuntreue.

4.8.2.3. Farbtreue: Der Color-Rendering-Index der LED

Die weiße LED hatte zu Beginn vielfach einen eher schlechten Ruf bei Lichtdesignern und Architekten, der mit der geringen Farbtreue des LED-Lichtes zu tun hatte. Das lag an der verwendeten Phosphortechnik, sie war gerade bei den günstigeren LEDs noch nicht so elaboriert und nur die teureren LEDs mit besseren Phosphoren konnten bereits den Vergleich mit Halogen- oder guten Metalldampflampen wagen.

Wie aber kann man objektiv die Farbqualität des Lichts messen? Ehrlich gesagt: fast gar nicht, denn der Lichteindruck bleibt letztlich immer subjektiv... Die Diskussion um schönes oder weniger qualitatives Licht war zumindest in der Beleuchtungsbranche alles andere als neu. Die Leuchtstofflampenhersteller hatten – auch nicht völlig zu Unrecht – bereits viele Jahre zuvor mit ähnlichen Vorwürfen zu kämpfen und

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

man einigte sich irgendwann auf eine Einteilung zur Bestimmung der realistischen Farbwiedergabe in Vergleich mit natürlichem Licht.

Die Farbtreue wird in den Einheiten CRI bzw. in abgespeckter Version mit weniger Parametern in Ra gemessen. Für Farbtemperaturen bis 5000 Kelvin wird als Referenz die Strahlung eines sogenannten „Schwarzen Körpers“ herangezogen, der im Prinzip eine Glühlampe (mit ihrem CRI-Wert 100) entspricht. Für Farbtemperaturen über 5000K wird das natürliche Sonnenlicht bzw. Tageslicht herangezogen. Im Beleuchtungsalltag ist es für viele Anwendungen sehr wichtig, dass die mit Kunstlicht beleuchteten Gegenstände trotzdem einen qualitativ guten Farbeindruck wiedergeben, nicht leblos oder unscheinbar, sondern natürlich und kräftig aussehen. Nehmen wir das Beispiel Obstgeschäft: Dort wirkt die Ware nur dann für uns Kunden als attraktiv, wenn sie so aussieht, wie wir das bei natürlichem Sonnenlicht gewohnt sind. Äpfel, die in ein fahles oder bläulichiges Licht getaucht sind werden ungekauft liegenbleiben. Andererseits tricksen die Händler bekanntlich auch schon lange mit Lichtfarben in ihrem Sinne und gaukeln uns Verbrauchern bei Fleischwaren oder Früchten Frische durch von Polarisationsfiltern erzeugte kräftige Farben vor. Eine hohe Farbtreue ist auch für Modegeschäfte oder Museen bzw. Galerien sehr wichtig.

Den dafür benötigten hohen CRI-Wert zu erreichen, erfordert von der LED-Industrie erhöhten Aufwand bzw. teurere Stoffe und Verfahren bei der Phosphorbeschichtung und ein enges Binning, was sich alles zusammen deutlich auf den Preis niederschlägt. Für Zwecke der Innenbeleuchtung ist ein CRI-Wert von größer 80 ausreichend, um Falschfarben zu vermeiden, für erhöhte Ansprüche muss er gegen 90 streben. Mittlerweile gibt es Phosphore, die einen CRI-Wert von 98 erreicht haben. Bei reiner Außenbeleuchtung kann der CRI/Ra die 80 durchaus unterschreiten, falls keine erhöhten Sichtanforderungen aus Gründen der Sicherheit vorliegen.

Am CRI-System ist auch Kritik laut geworden, es bilde die Farbtreue ungenügend oder sogar falsch ab, besonders im Bereich um die 5000 K, weil dort 2 Referenzmodelle stufenlos aufeinandertreffen. Ich denke, der CRI-Index ist dennoch so weit brauchbar, da die Relativität der Farbwahrnehmung stets bewirkt, dass man mit keiner bestimmten Klassifikation wirklich alle zufriedenstellen kann.

4.8.3. Einschub: photo- und radiometrische Größen u. deren Messung

Wer bestimmte Anforderungen an eine Lichtquelle stellt, muss messbare Größen heranziehen, um Werte zu bestimmen bzw. zu vergleichen. Wenn wir als Licht-Empfänger über das Licht einer Lampe Aussagen mit bewertendem bzw. qualitativem

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

ist das Lumen also unabhängig von der Größe der Lichtquelle bzw. des Lichtaustrittswinkels.

- Beleuchtungsstärke:

Die Beleuchtungsstärke wird in "lx" für Lux gemessen. Bei einem Lux trifft der Lichtstrom von 1 Lumen gleichmäßig auf eine Fläche, mit der Größe 1 m^2 .

Lux ist eine wichtige Messgröße für die Beleuchtungsplanung und auch für Vorschriften, z.B. EU-Arbeitsstättenrichtlinien fordern mindestens 500 lx für Arbeitsplätze, gemessen in Arbeitshöhe.

4.8.3.2. Radiometrische Größen

Diese beziehen sich im Gegensatz zu vorigen Größen nicht auf das, was ankommt, sondern auf das Ausgestrahlte. Für den LED-Anwender sind sie i.d.R. nicht von großer Bedeutung und seien nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

- Strahlungsleistung:

Die Strahlungsleistung ist die Energie, die in einer bestimmten Zeit abgegeben wird. Ihre Einheit ist die physikalische Standardeinheit W für Watt. Davon abgeleitet werden:

- Strahlstärke: W/sr als das Verhältnis von abgegebener Strahlungsleistung pro Steradian und
- Bestrahlstärke W/m^2 als das Verhältnis von aufgenommener Strahlungsleistung pro Fläche in m^2

4.8.3.3. Messgeräte

Um die Lichtstärke oder Beleuchtungsstärke zu messen, benützt man im einfachsten Fall ein portables, relativ preiswertes Photometer, auch Luxmeter genannt. Es verfügt über einen lichtempfindlichen Sensor, der rein aus praktischen Gründen nicht starr mit dem Gerät verbaut sein sollte, damit Strahlungsrichtung und Display-Richtung zum Ablesen nicht gleichgerichtet sein müssen, man immer bequem ablesen kann. Wer also z.B. wissen will, ob auf seinem Schreibtisch wirklich 500 lx ankommen, legt den Lichtsensor auf die Schreibtischplatte und misst an verschiedenen Stellen die tatsächliche Beleuchtungsstärke. Das Luxmeter eignet sich nicht für vergleichende Messungen von verschiedenen Leuchten, wie z.B. die Messung der gesamten Strahlungsleistung einer bestimmten Lichtquelle, deren Lichtstrom mit

4.8. Lichteigenschaften, Lichtwerte und Bedeutung



Abbildung 4.23.: Luxmeter zum Messen der Beleuchtungsstärke (cd/lx)

einer anderen verglichen werden soll.

Für gerichtete Lichtquellen, also z.B. LED-Spots, kann man durch eine relativ aufwendige Messung verschiedener Bereiche des Lichtkegels bei definiertem Abstand von einem Meter und unter anschließender Mittelung / Interpolation der erhaltenen Werte einen brauchbaren Näherungswert erreichen, der eine gewisse Vergleichbarkeit für identische Abstrahlwinkel zulässt. Anleitungen dazu finden sich im Internet.

Für Messungen des Lichtstroms benötigt man eine Ulbrichtkugel in geeigneter Größe. Wie funktioniert eine Ulbrichtkugel (Integrating sphere)?

Die Messeinrichtung besteht aus einer hohlen Kugel und Messgeräten. Die 2-teilige Kugelhülle wird zum Bestücken geöffnet, zum Messen dann wieder dicht verschlossen. Ihre glatten Innenwände sind mit einer reinweißen, reflektierenden Farbschicht beschichtet. Zum Messen wird die entsprechende Lichtquelle idealerweise Kugel-mittig positioniert, i.d.R. hängt sie von oben herab an ihrer Zuleitung. Das Prinzip: Durch die Kugelgeometrie wird die an der Innenwand gleichförmig reflektierte Gesamtstrahlung der Lichtquelle, d.h. die Totalreflexion der eingebrachten Lichtquelle minus einem fixen Reflexions-Verlustfaktor, gemessen. Die weiße Beschichtung der Innenseite bewirkt, dass die Lichtstrahlen diffus reflektiert und komplett gemischt werden, bevor diese Mischung reflektierter Strahlen auf einen Mess-Sensor auftrifft. Die Lichtquelle sollte stets relativ klein im Verhältnis zum

4. Herstellung der blauen GaN-LED:



Abbildung 4.24.: Integrating Sphere / Ulbrichtkugel

Kugeldurchmesser sein, um Messfehler und Ungenauigkeiten zu minimieren. Das bedeutet für größere Lichtquellen bedarf es einer entsprechend großen Ulbrichtkugel. Den Mess-Sensor schirmt man in Richtung der Leuchtquelle ab, damit der Anteil direkter Lichtstrahlen von der Lichtquelle den zu messenden Reflexionswert nicht verfälscht. Die Höhe der Reflexionsverluste an den mit einer speziellen Farbpigmentschicht behafteten Wänden kann leicht durch die Berücksichtigung dieser prozentual stets gleichen, Ulbrichtkugel-typischen Verlustleistung verrechnet werden. Zum Eichens benötigt man lediglich eine geeichte Einheitslichtquelle (Lichtstrom-Normal) mit genau definiertem Lumenoutput. Die sich ergebende Differenz zum erhaltenen Messwert der Versuchsanordnung bestimmt damit den konstanten Verlustfaktor der jeweiligen Messanordnung, der dann durch Subtraktion vom erhaltenen Messergebnis zu berücksichtigen ist.

Viele Lampenhersteller geben zwar einen Efficacy-Wert als Maß für die Lichtausbeute bzw. den Wirkungsgrad in lm/W an, weisen aber aus verkaufstaktischen Gründen oft gar nicht oder nur sehr ungenügend darauf hin, dass dieser meist idealisierte Wert sich nur auf den LED-Chip direkt und nicht auf die komplette Lampe/Leuchte mit Optik bezieht. Dieser verkaufsfördernde Wert ist oft unter idealen Bedingungen und nur für einen separaten Chip ermittelt worden und so in

4.8. *Lichteigenschaften, Lichtwerte und Bedeutung*

der Praxis deshalb eigentlich nicht zu erreichen. Jede Linse oder Lichtabdeckung mindert diesen Wert genauso drastisch wie auch eine nahe Gruppierung mehrerer LEDs oder ein suboptimales Wärmemanagement. Und selbstredend gilt dieser Wert nur für bestimmte konstante Umgebungstemperaturen und definierte Weise der elektrischen Ansteuerung. Ungewöhnlich hohe Lumen-per-Watt Angaben bei auffällig niedrigen Preisen sind eher kritisch zu hinterfragen...

Hersteller-Angaben zu Retrofits, Leuchten oder anderen LED-Produkten bzgl. der korrelierenden Farbtemperatur sind gerade bei chinesischen Billig-Herstellern auffallend unpräzise. Wenn z.B. warm-weiß mit 3000 - 3500 angegeben wird, ist zu befürchten, dass je nach Charge deutlich sichtbare Farbunterschiede auftreten können. Aus meiner Erfahrung heraus sind die tatsächlichen Werte häufig am oberen Rand des Wertebereichs oder darüber verortet. Im genannten Beispiel tendiert das Warm-Weiß mit 3500 Kelvin und darüber also eher Richtung Neutral-Weiß. Die große Spanne in der Farbtemperaturangabe ermöglicht den Herstellern die Verwendung günstiger Bins unterschiedlichster Herkunft. Für den Endkunden entsteht der Nachteil, dass ein Ersatz in gleicher Lichtfarbe oft unmöglich wird.

Wie stellt man Farbunterschiede fest? Weil professionelle Messgeräte zur Farbbestimmung relativ teuer sind, empfiehlt es sich, den Farbunterschied mit Hilfe von Vergleichslampen und durch bloßen Augenschein zu ermitteln. Mit wenig Übung entwickeln die meisten von uns schnell ein feines Gespür für Farbunterschiede.

Wer wirklich wissen will, was für ein „weiß“ seine LED aussendet, oder ob die vielleicht schon vorhandenen Hersteller-Angaben zum Binning wirklich stimmen, kommt nicht umhin, ein optisches Spektrometer einzusetzen, das das Weißlicht in seine einzelnen Spektralfarben aufteilt und die spezifische Zusammensetzung dieser Farben analysiert. Für den Privatgebrauch ist das natürlich zu aufwändig und teuer, die Kosten für ein kombiniertes Gerät, Hardware mit Software, das alle radio-, photo- und farbmtrischen Größen ermitteln kann liegen bei einem Mittelklassewagen. Oft ist es interessant, die Leuchtdichte und Lichtfarbe einer Lichtquelle zu bestimmen. Dazu taugen sogenannte CCD-Sensor-Cameras, deren optischer Sensor wie bei einer Filmkamera in der Lage ist, Helligkeits- und Farbunterschiede zu bestimmen und fein aufzulösen. Die Genauigkeit dieser CCD-Arrays reicht aus technischen Gründen zwar für viele Anwendungen aus, kommt aber nicht an die exakteren Bestimmungsmethoden des Spektralradiometers heran. Der große Vorteil liegt aber in der Mobilität solcher Geräte und dem relativ geringeren Anschaffungspreis.

Sobald Optiken das LED-Licht formen und lenken, wird es interessant, wie viel Licht wo genau ankommt. Aus der Spezifikation dieser Eigenschaften einer Leuchte,

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

ihren photometrischen Daten, kann der Beleuchtungsfachmann feststellen, ob sie für seine spezielle Beleuchtungs-Aufgabe geeignet ist oder eher nicht. Als anschauliches Beispiel seien wiederum Straßenleuchten mit ihrer ausgeprägt asymmetrischen Lichtverteilung genannt. Viele kennen solche photometrischen Darstellungen von Leuchten aus Eulumdat (LDT) oder IES-Files, die der Leuchtenhersteller dem Lichtplaner zur Verfügung stellt. Diese Daten werden mit Hilfe eines Gerätes namens Gonio-Photometer ermittelt. Dieser besteht aus einer motorisierten 360 Grad-Drehvorrichtung für die Lichtquelle und einer der oben genannten Messapparaturen zur Ermittlung der Winkel-abhängigen photometrischen und eventuell radiometrischen Daten.

4.9. Messen und Binning der LED

Schritt 19: Binning

Die LED-Hersteller versuchen zwar alle Prozesse zu kontrollieren, um vorhersagbare Ergebnisse zu erzielen, es ist aber nicht möglich, einen oder mehrere Wafer herzustellen, auf dem alle LEDs die selben Licht- bzw. elektrischen Eigenschaften besitzen. Das hat nicht nur mit den relativ kleinen Ungenauigkeiten bei Schichtdicken im Wafer oder Phosphor, oder mit variierenden Dotierung-Verhältnissen zu tun. Der quantenphysikalische Einfluss bei der Rekombination und Photonen-Emittierung verhindert quasi ein exakt gleiches Abstrahlverhalten per Naturgesetz. Zufall und Chaos regieren auf subatomarer Ebene, aus Ursache und Wirkung werden bloße Wahrscheinlichkeiten. Im Ergebnis erhält man aus einem Wafer, spätestens aus einer größeren Menge LEDs aus gleicher Produktions-Charge LEDs mit unterschiedlicher Leistungscharakteristik. Für die Käufer, die Beleuchtungsindustrie ist es aber wertvoll, gleichwertige Ware mit definierten Eigenschaften für einen bestimmten Leuchtentyp einzusetzen und diese LEDs dafür auch in Zukunft noch genau so vom Hersteller geliefert zu bekommen.

LED-Hersteller teilen deshalb ihre produzierten LEDs in verschiedene Klassen für jeden Typ ein. Diese Klassifikation nach unterschiedlichem Leistungsverhalten heißt Binning, nach dem englischen „bin“, was soviel wie Topf oder Eimer heißt. Je nach Hersteller bzw. Produktkategorie ist das Binning hochwertiger, d.h. es existieren mehr und kleinere Töpfe und somit erhält man nicht nur genauere Wertangaben, sondern auch ein besseres Produkt. Alle Hersteller sortieren wenigstens nach Lichtfarbe bzw. -Temperatur/ Chromatizität, Lichtstrom und Vorwärtsspannung. Diese Sortierung und Kennwertangabe, der Bin-Code kann aber natürlich erst erfolgen, wenn diese Parameter auch wirklich erhoben worden sind.

4.9.1. Einmessen der LED

Tatsächlich wird jede LED nach dem Separieren vom Wafer bzw. nach dem Verbau automatisch durchgemessen, in dem sie für den kurzen Moment von 20 Millisekunden zum Leuchten gebracht wird und dabei ihre individuelle Charakteristika preisgibt. Gleichzeitig hilft dies der Hersteller- internen Qualitätskontrolle, die Prozessparameter zu justieren. Inzwischen ist kundenseitig Kritik an dieser Weise des Binnings laut geworden. In den 20 ms, wird nämlich die LED gerade mal um wenige Grad mehr als die Umgebungstemperatur erwärmt. Weil LEDs aber normalerweise viel wärmer als 25 Grad Celsius werden, verändern sich entsprechend die physikalischen Eigenschaften und Werte für den Normalfall. Wir erinnern uns an die Kennlinie mit stark ansteigendem Graph-Verlauf. Tatsächlich kommt es auch je nach Temperaturänderung zu einer deutlichen Farbverschiebung, bei größerer Wärme nimmt die Wellenlänge prinzipiell ab (Blauverschiebung), bei geringerer entsprechend zu (Rotverschiebung). LED-Hersteller stellen ihren Kunden zwar Konversionstabellen zur Verfügung, aber es handelt sich dennoch um Näherungen...

Wer sich jetzt fragt, warum die Testdauer nicht einfach erhöht wird: der Hersteller hat kein Interesse an einer Beschädigung seines Produkts durch Überhitzung wegen fehlender Wärmeableitung. Die Hersteller hochwertiger Chips haben auf die Kritik mit einer Änderung des Verfahrens, dem sogenannten Hot-Binning reagiert. Cree begann 2011 mit dem Messverfahren, bei dem der Chip auf 85 Grad C vorheizt und man so zu verlässlicheren Werten kommt. Inzwischen ist Hot-Binning für hochwertige Produkte bzw. bei den namhaften Herstellern Standard geworden.

Interessant ist, dass Vorgängertechnologien wie Leuchtstofflampen und Gasentladungslampen natürlich auch Schwankungen über eine oder mehrere Chargen aufwiesen, die Hersteller sich aber niemals auf eine so exakte Klassifizierung eingelassen hatten und diesbezügliche Kundenbeschwerden mit dem Verweis auf unkontrollierbare Fertigungstoleranzen zurückwiesen. Warum diesmal dieses unumkehrbare Commitment? Ich vermute, dass es u.a. mit Preispolitik zu tun hat. Der qualitative Unterschied bei LEDs gleicher Leistung ist gewaltig und so erwartet man bei teuren LEDs ein besseres Binning. Da LED-Hersteller und Lampenhersteller nicht wie bei der Vorgängertechnologie Leuchtstofflampe identisch sind, kann nicht mit einer Mischkalkulation gearbeitet werden, die nebenbei die tatsächlichen Herstellungskosten schön verschleiern.

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

4.9.2. Binning-Kriterien

Der LED-Hersteller weist jedem seiner LED-Produkte eine mehrstellige Bestellnummer zu, wobei die einheitliche Nomenklatur dem Kunden auf dem Datenblatt erklärt wird, also an welcher Stelle des Codes welche Zahlengruppen was bedeuten. Je nach Produkt können Unterscheidungen in unterschiedliche CRI-Werte zu diversen Untergruppen führen. Der Minimum-Lichtstrom so wie die Lichttemperatur wird bei einem definierten Strom, z.B. 350mA und unter Testbedingungen (25 Grad C) angegeben. Bei weißen LEDs wird die Farbtemperaturzuordnung, z.B. 3500K als Chromatizitäts-Region xY gekennzeichnet, die die Bandbreite auf der CIE-Normskala repräsentiert.

Im unten gezeigten Beispiel eines Cree-Produktes, sind diese korrelierenden Farbtemperaturregionen (CCT) graphisch eingezeichnet: Je kleiner die Fläche, desto exakter das Binning. Für buntfarbige LEDs wird die Dominante Wellenlänge gruppiert, z.B. Blau in Gruppe Z mit min. 460 bis max. 465 nm bei 350mA u. 8,2lm. Der Code enthält auch Angaben zu optischen Merkmalen und Anzahl der LEDs im Chip.

4.9.3. Weitere Herstellerangaben

Die weitere Verarbeitung der LED beim Packager, oder Lampen-/Leuchten-Hersteller muss so erfolgen, dass die LED ihre Leistungscharakteristik behält. Aber schon beim Lötten und später beim Aufbringen auf einen Kühlkörper kann die empfindliche LED Schaden nehmen. Deshalb werden dem LED-Kunden z.B. optimale Werte für Löttemperaturen und Lötzeiten genannt. Weiterhin wird er mit technischen Daten von Chip und Reel versorgt, die zum Einstellen der Bonding-Maschinen nötig sind. Nach dem erfolgten Binning erhalten LEDs, die eine Primäroptik besitzen, diese im Rahmen des Packaging. Eine letzte Qualitätskontrolle noch und der Chip (Die) ist dann fertig zum Verpacken.

4.9.4. LED Verpacken

Schritt 20: Verpacken

Die fertigen LED-Chips/Dies werden in sogenannten Reels, das sind aufgerollte Bänder/Gurte, ähnlich einer Filmrolle oder einem Patronengurt, die LED-Chips aufnehmen, verpackt. Daraus können sie von Automaten entnommen und auf feste oder flexible Platinen gebondet werden. Für den Transport werden metallisierte Verpackungen, die vor elektrostatischer Aufladung schützen, verwendet.

4.9. Messen und Binning der LED

So, die weiß-farbige LED ist für den Einsatz beim Lampen- bzw. Leuchtenhersteller fertig! Wer bis hierher den vielschichtigen Fertigungsprozess verfolgt hat, kann sich vorstellen, warum eine LED zwangsläufig relativ teurer als eine Glühbirne sein muss...

4. Herstellung der blauen GaN-LED:

CREE'S STANDARD CHROMATICITY REGIONS PLOTTED ON THE 1931 CIE CURVE (CONTINUED)

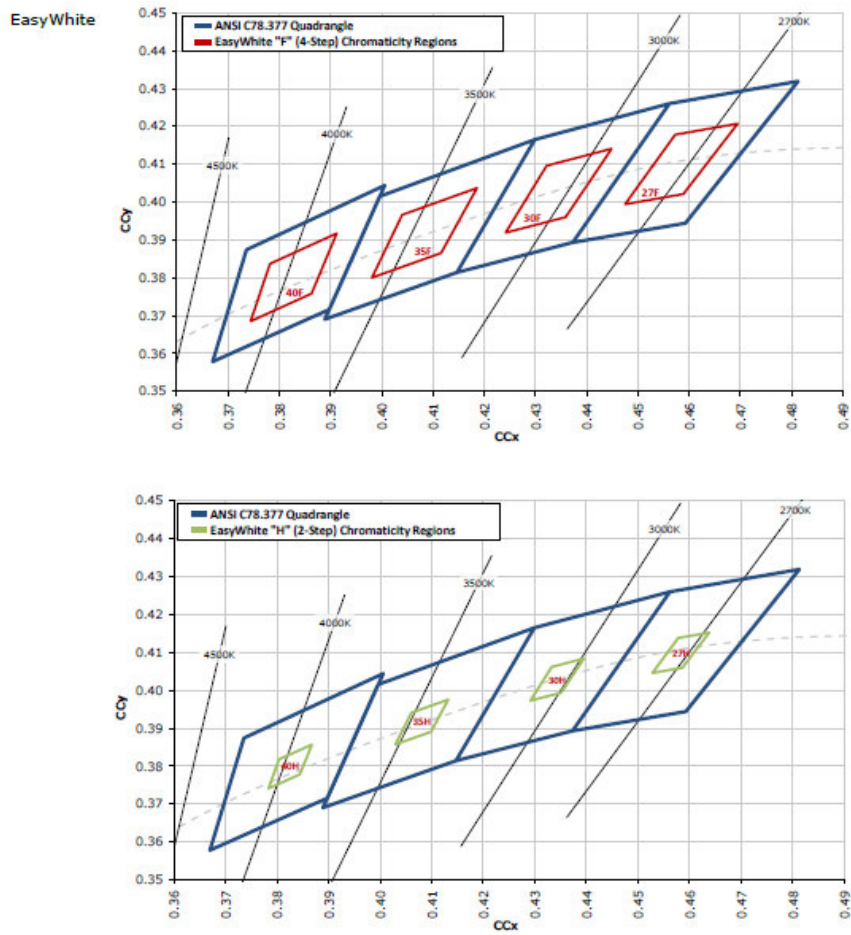


Abbildung 4.25.: Binning Range einer Cree LED

4.9. Messen und Binning der LED

Profile Feature	Lead Free Assembly
Average Ramp-Up Rate ($T_{s_{max}}$ to T_p)	3°C / second max
Preheat Temperature Min ($T_{s_{min}}$)	150°C
Preheat Temperature Max ($T_{s_{max}}$)	200°C
Preheat Time ($t_{s_{min}}$ to $t_{s_{max}}$)	60 - 180 seconds
Temperature (T_l)	217°C
Time Maintained Above Temperature (T_l)	60 - 150 seconds
Peak / Classification Temperature (T_p)	260°C
Time Within 5°C of Actual Peak Temperature (t_p)	20 - 40 seconds
Ramp - Down Rate	6°C / second max
Time 25°C to Peak Temperature	8 minutes max

Abbildung 4.26.: Herstellerangaben zum Löten/Bonden einer LED

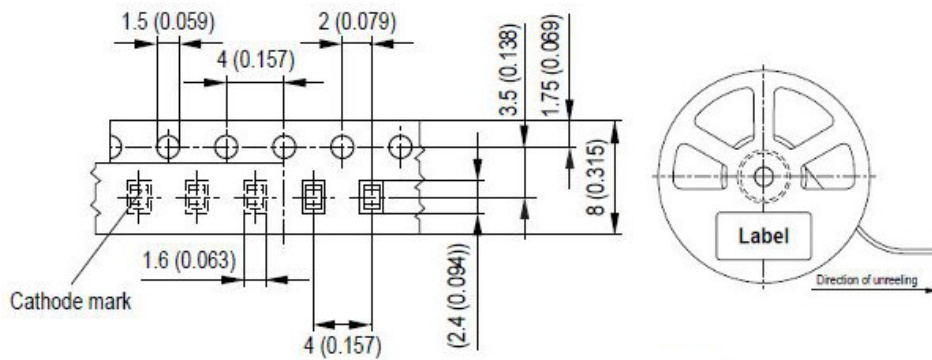


Abbildung 4.27.: Herstellerangaben zum Reel

Kapitel 5

LED-Optiken

Warum werden überhaupt optische Bauteile in Lampen eingesetzt? Das hängt sehr von der Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle und natürlich entsprechend auch vom Verwendungszweck der Lampe ab. Bei einer Glühbirne wird das Licht von der Glühwendel mehr oder weniger gleichmäßig in alle Richtungen abgestrahlt. Deckenleuchten mit Glühbirnen als Leuchtmittel haben deshalb zur besseren Lichtausbeute über der Birne einen Spiegel-Reflektor angebracht, der das nach oben abstrahlende Licht nach unten reflektiert, damit auch dieser Teil unten ankommt. Beim handelsüblichen 12V-Halogenspot wird das Licht bereits im Leuchtmittel gerichtet. Ein großer Teil, vor allem rückwärts und seitwärts gerichtete Lichtstrahlen, der vom Glühdraht ungerichtet abgestrahlten Lichtstrahlen trifft hier auf den trichterförmigen Reflektor auf und wird quasi-parallel nach vorne abgelenkt, so dass ein Lichtpunkt (Spot) bestimmter Größe, in Abhängigkeit vom Reflektor-Trichter bzw. resultierenden Abstrahlwinkel, entsteht.



Abbildung 5.1.: MR16 Halogen-Spot

5.1. *Einschub: Opto-physikalische Eigenschaften des Lichts*

Der Abstrahlwinkel einer Leuchtquelle ist per Definition der Winkel, in dem die Leuchtkraft der Leuchtquelle mindestens 50 Prozent ihrer Intensität beträgt. Je kleiner der Abstrahlwinkel, desto höher die Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärke innerhalb des Lichtkegels bzw. Leuchtflecks und desto heller erscheint uns die Lichtquelle. Eine LED kann durch ihre zweidimensionale Bauweise in der Theorie maximal den Raum einer Halbkugel beleuchten. Bei den meisten SMD-LEDs, die ohne eine das Licht lenkende Optik verkauft werden, beträgt der Abstrahlwinkel regelmäßig ca. 120 Grad, weil die LED mitsamt ihrer oberen Phosphorschicht in einer trichterförmigen Senke sitzt, die mit ihren Rändern den Lichtstrahl vorformt. Das Licht verteilt sich also ohne weitere Optik auf eine relativ große Bestrahl-Fläche.

Für die LED spielen optische Mittel zur Lichtlenkung eine große Rolle, da die Erwartungen an die Effizienz bei der LED immer sehr hoch sind. Um möglichst viel Licht aus der LED zu bekommen muss einerseits die LED selbst dahingehend optimiert werden, andererseits gilt es das austretende Licht dahin zu lenken, wo es gefordert ist.

5.1. Einschub: Opto-physikalische Eigenschaften des Lichts

Damit man das Licht wie gewünscht lenken kann benötigt man die Kenntnis des physikalischen Verhaltens von Lichtstrahlen. Licht besteht wie jede andere Form elektromagnetischer Strahlung, die mit unserem Auge nicht sichtbar ist, z.B. Röntgen- oder Infrarotstrahlung, letztlich aus Photonen, den kleinsten bekannten Bausteinen elektromagnetischer Strahlung welche relativ seltsame Eigenschaften aufweisen. So besitzt das Photon im Vergleich zum Elektron, das selbst schon eine unvorstellbar kleine (Ruhe-) Masse von $9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ (0,... mit 30 Nullen hinter dem Komma vor der 91) besitzt, überhaupt keine Masse. Dies ist auch der Grund, warum es sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen kann. Obwohl es keine Masse hat, besitzt es eine Energie.

(Diese interessante Eigenschaft macht sich z.B. dadurch bemerkbar, dass (Licht-) Strahlen einen Druck, den sogenannten Strahlungs- oder Lichtdruck, auf andere Körper ausüben. In relativ kleinen Dimensionen ist der Strahlungsdruck zwar relativ gering, kann aber für größere Dimensionen nutzbar gemacht werden. Die NASA experimentiert derzeit mit großen Solarsegeln als Antrieb für die Raumfahrt. In relativ riesigen Dimensionen, wie z.B. im interstellaren Bereich, wo große Strahlungsleistungen entstehen, wirkt sich der Lichtdruck aber schon entscheidend auf die Bewegung von Sternen und Sternwolken aus.)

Die Energie der Photonen aus dem GaN-Halbleiter ist immerhin groß genug, den

5. LED-Optiken

Phosphor zum Leuchten anzuregen. Photonen besitzen wie alle kleinsten Masse-Teilchen einen Spin, d.h. einen Drehimpuls, der von ihrer Wellenlänge abhängig ist. Sie entstehen in verschiedenen Prozessen, z.B. in Nuklear-Reaktionen, bei Fluktuationen im elektromagnetischen Feld, oder wie in unserem Fall im Halbleiter - Bandübergang durch Quantensprung der Elektronen auf ein relativ niedrigeres Energieniveau. Sie besitzen eine unendliche Lebensdauer, solange sie nicht auf Masse treffen, dort absorbiert werden und dabei auch ihre ganze Energie an die Masse abgeben (Grund: Energieerhaltungssatz).

Wie muss man sich einen Lichtstrahl eigentlich bildlich vorstellen? Das hängt von den Dimensionen ab... Der Lichtstrahl ist nicht wie sein Name vermuten lässt ein kontinuierlich verteilter „Energie-Faden“. Vielmehr besteht Licht aus einer Abfolge von Energie-Quanten / Photonen, die bildlich gesprochen zu Paketen gruppiert (gequantelt) sind. Diese Pakete bewegen sich im Weltraum / Vakuum ohne Richtungsänderung (außer Ablenkung durch sehr große Massen wie schwarze Löcher) mit Lichtgeschwindigkeit (über eine Milliarde km/h). In der Atmosphäre treffen die Photonen jedoch auf Hindernisse, z.B. Partikel wie Staub, Ruß oder Wasser in der Luft. Dadurch wird ihre Gruppengeschwindigkeit verringert, sie werden vom Weg abgelenkt, oder absorbiert. Die Ablenkungs- und Absorptions-Effekte sind bei diffusem Tageslicht und blauem Himmel gut sichtbar: die Luft leuchtet manchmal förmlich. Gleiches gilt in verstärkter Weise für die Photonenbewegung in Medien, die dichter als Luft sind, wie z.B. Glas. Die einzelnen Photonen können zwar unterschiedliche Energieniveaus besitzen, werden aber stets als Ganzes erzeugt bzw. auch als Ganzes wieder vernichtet, was typisch für Quanten ist.

Monochromatisches Licht einer bestimmten Wellenlänge besteht aus sehr vielen einzelnen Energiepaketen mit jeweils einheitlich gleich großer (Paket-)Energie. Die Helligkeit bzw. Intensität der gleichen Lichtfarbe ändert sich entsprechend der Anzahl der sich gleichzeitig mit Lichtgeschwindigkeit bewegenden Pakete.

5.1.1. Licht als Quantenobjekt: Teilchen und Welle

Kann man das Licht genau kontrollieren?

Praktisch gesehen heißt die Antwort Ja und theoretisch eher Nein. Das Verhalten von Lichtstrahlen kann mit technischen Mitteln zwar relativ gut kontrolliert werden, aber prinzipiell nur bis zu einem gewissen Maß. Weil das Photon ein Quantenobjekt ist, sich gleichzeitig einerseits wie ein klassisches Masse-Teilchen und andererseits wie eine reine, d.h. von Masse freie Welle verhält (Welle-Teilchen-Dualismus), ist sein Verhalten nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit vorhersehbar. Für einige

5.1. Einschub: Opto-physikalische Eigenschaften des Lichts

Bereiche der geometrischen Optik, wie z.B. Licht-Brechung und Reflexion kann man das Photon in der Praxis aber schon vereinfacht als Teilchen mit vorhersagbarem, linearen Verhalten betrachten, da sich die Ergebnisse beider Effekte oft gleichen. Das ist hilfreich für die Entwicklung von Optiken zur Lichtlenkung.

Am Beispiel der Helligkeitsverteilung von Licht lässt sich die Zwittereigenschaft des Lichts, ihr Wellen- und Teilchencharakter, verdeutlichen: Hinsichtlich des reinen Teilchencharakters würde eine eindeutig verteilte Helligkeit entstehen, die daraus resultieren würde, dass ein Photon an einem bestimmten Ort auftrifft, diesen durch Reflexion erhellt, oder eben nicht, es weiterhin dunkel bleibt. Hinsichtlich des Wellencharakters können durch Überlagerung mehrere Wellen, man spricht von Interferenz, im Ergebnis sowohl eine Verstärkungen der ursprünglichen Helligkeit, oder entsprechende Verminderungen dieser bis zur vollständigen Licht-Auslöschung stattfinden. Das bedeutet, dass beim Wellencharakter lediglich eine chaotische / zufällige Wahrscheinlichkeit für den Zustand Hell oder Dunkel existiert, die Helligkeit entsprechend sehr ungleichmäßig verteilt ist. Tatsächlich finden beim Licht beide Phänomene gleichermaßen statt. Wellen aller Art besitzen Eigenschaften, die sich in zwei wichtigen Effekten bemerkbar machen, der Möglichkeit von Interferenz und der Möglichkeit von Beugung.

5.1.2. Interferenz bei Lichtwellen

Interferenz bedeutet den Effekt der Überlagerung zweier oder mehrerer Wellen, der sich als Addition der physikalischen Eigenschaften der interagierenden Wellen bemerkbar macht.

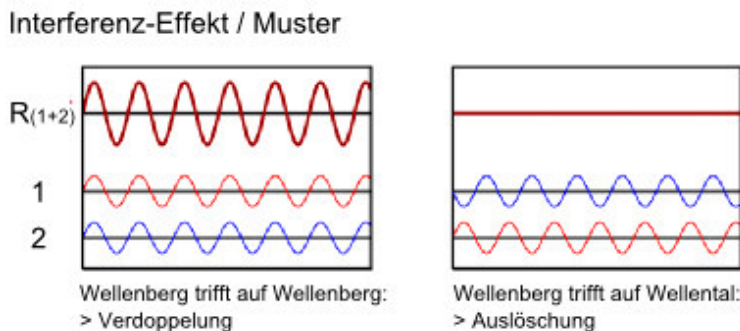


Abbildung 5.2.: Interferenz

Nehmen wir rein theoretisch an, dass beim Licht einer weißen LED lediglich der

5. LED-Optiken

Rot-Anteil durch Interferenz-Effekte betroffen wäre, würde je nach Phasengang entweder eine Farbverstärkung durch Vervielfachung eintreten (das weiße Licht wird somit insgesamt rötlicher bzw. wärmer), eine Abschwächung (weniger Rotintensität, Licht wird kälter...), oder gar eine Auslöschung der roten Lichtfarbe stattfinden. Interferenzphänomene betreffen bei der Überlagerung verschiedener Wellenlängen auch die resultierenden Mischfarben, was sich z.B. in der Entstehung eines Grautones bemerkbar machen kann.



Abbildung 5.3.: Weißlichtinterferogramm

Interferenz-Phänomene treten überall dort auf, wo Wellen im Spiel sind. So wird z.B. in der Akustik mit gezielter Auslöschung von Schallwellen aktiver Schallschutz betrieben, oder die Erkrankung Tinnitus mit der Erzeugung phasenverschobener Wellen gleicher Frequenz im Ohr bekämpft. Auch in der Elektronik wirken sich die Phänomene der Phasenverschiebung und Interferenz bemerkbar aus, sie erzeugen ungewollte, weil störende Oberschwingungen, die sich nicht nur im LED-Betrieb bemerkbar machen. Mehr dazu aber an späterer Stelle.

5.1.3. Beugung von Lichtwellen

Die nach der Interferenz zweite besondere Eigenheit des Wellencharakters ist die Möglichkeit der Beugung der Welle. Trifft eine Lichtwelle auf ein Hindernis, kann ein bestimmter Teil der Wellen vom Weg abgelenkt werden, seine Richtung ändern und damit den Teil erreichen, der auf direktem Weg wegen des Hindernis nicht erreichbar wäre. Die Beugung des Lichts wird beim Durchlass durch einen engen Spalt (bzw. Loch) sichtbar, im Effekt ist hier die bestrahlte Fläche hinter dem Spalt größer, als es die Breite der Öffnung eigentlich vorgibt. Das Licht biegt sich förmlich um die Ecke beim Auftreffen auf die Kanten. Dieser Beugungs-Effekt ist z.B. bei Kameraobjektiven dafür verantwortlich, dass die Auflösung begrenzt ist, sich stets eine gewisse Unschärfe im äußeren Bildbereich einstellt, wo der Teil, des um die Ecke gebeugten Lichts abgebildet wird.

Beugungseffekte entstehen, wenn die Wellenlänge des Lichts größer ist, als die Blendenbreite ist. Je größer die Wellenlänge des Lichts, desto stärker wird es gebeugt.

5.1. Einschub: Opto-physikalische Eigenschaften des Lichts

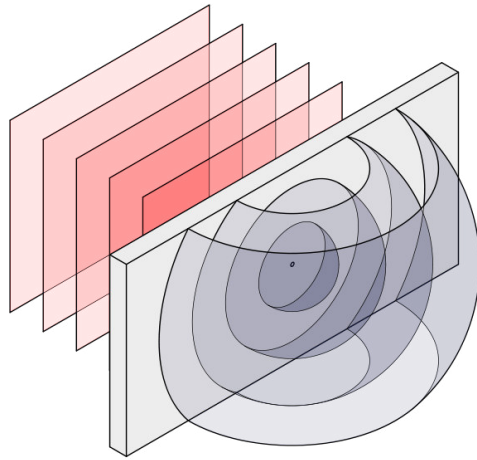


Abbildung 5.4.: die Lichtwelle wird hinter einer kleinen Lochblende zur Kugelwelle

Das bedeutet für die sichtbaren Lichtfarben, je mehr Rot-Anteil (rot = längere Wellenlänge als blau) das weiße LED-Licht hat, desto größer die Beugungseffekte, je mehr Blau desto kleiner die Beugungseffekte. Zugleich wird der langwelligere Spektralbereich des Weißlichts mehr gebeugt, als der kurzwelligere. Durch die Beugung entstehen Interferenzen mit den besagten Effekten. Beugung, auch Diffraktion genannt, trifft auf alle Wellen zu, also auch Schallwellen oder Wellen im Wasser.

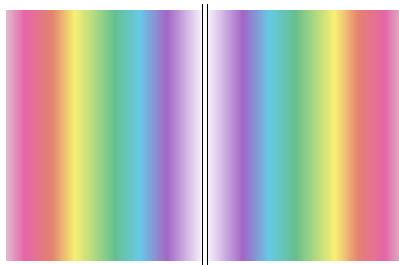


Abbildung 5.5.: Beugung am Lichtspalt

Im Bild oben ist zu sehen: Das langwelligere Licht in Richtung Rot ist relativ weiter vom Spalt entfernt noch sichtbar als das kurzwelligere (z.B. Blau).

5. LED-Optiken

5.1.4. Reflexion, Transmission und Lichtbrechung

In der geometrischen Optik wird das Licht zur Veranschaulichung seines Verhaltens vereinfachend so behandelt, als ob es tatsächlich ein Lichtstrahl wäre, man sagt daher auch Strahlenoptik. Die aufgezählten Effekte wie Beugung und Interferenz werden vernachlässigt, was zulässig ist, solange die Anordnung relativ zur Wellenlänge des Lichts wesentlich größer ist. In der Strahlenoptik ist die Wegrichtung des Lichtstrahls umkehrbar, ein Strahl beeinflusst einen anderen nicht und ändert seine Richtung nur durch Reflexion oder Lichtbrechung. Das Reflexionsgesetz der Optik besagt: Der Winkel unter dem die Lichtwelle einfällt entspricht auch dem Winkel in dem die Lichtwelle reflektiert wird:

$$\text{Einfallswinkel } (\alpha_e) = \text{Ausfallswinkel } (\alpha_a)$$

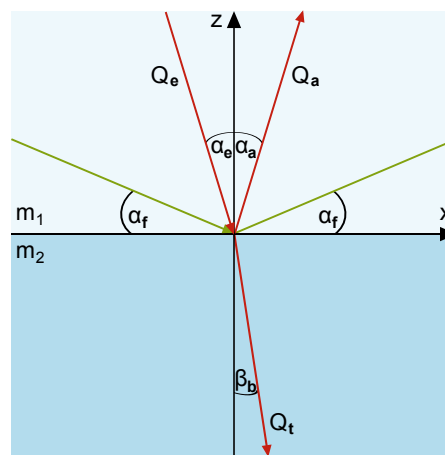


Abbildung 5.6.: Gesetze der Strahlenoptik

Bild oben: Schema Partielle Reflexion, Totalreflexion und Transmission

Diese Eigenschaft kann man sich u.a. in Reflektoren zunutze machen, wo das Licht entsprechend der Beleuchtungsaufgabe entsprechend umgelenkt, d.h. ausgerichtet wird. Wie viel Licht tatsächlich reflektiert wird, hängt von den Reflexionseigenschaften der reflektierenden Oberfläche und von der Wellenlänge der auftreffenden Lichtwellen ab. Bei nicht absorbierenden Materialien entsteht die Totalreflexion dann, wenn der Winkel des einfallenden Lichts größer als der Grenzwinkel der Totalreflexion ist. Der Wert des Grenzwinkels ist Abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit. Ein anschauliches Beispiel dafür ist die Abend-Sonne am Horizont, die aufs Wasser

5.1. Einschub: Opto-physikalische Eigenschaften des Lichts

scheint. Wegen des flachen Einfallswinkels wird ein sehr hoher Teil an der Wasseroberfläche direkt reflektiert, die Sonne spiegelt sich im Wasser. Die Wasseroberfläche stellt eine Grenzschicht (m_2/m_1) vom optisch dickeren Medium (Wasser) zum relativ optisch dünneren Medium Luft) dar. In der Praxis gilt: Je glatter die Oberfläche ist, desto höher und desto gleichmäßiger ist allgemein die Reflexionsleistung. Die verlustfreie Totalreflexion wird in der Realität nicht wirklich zu 100 Prozent erreicht, ein geringer Teil wird stets absorbiert, deshalb spricht man auch bei sehr ebenen Oberflächen von partieller Reflexion. Sehr gute Spiegel, wie sie z.B. in der Astronomie eingesetzt werden erreichen mit enormen Aufwand annähernd die Totalreflexion. Auch Lichtleiter aus Glasfaser ermöglichen einen beinahe verlustfreien Transport von Laserlicht über sehr weite Distanzen (bis zu 20 km ohne Verstärker). Im Inneren des Glaskabels spiegelt sich der in einem relativ flachen Winkel eingebrachte Lichtstrahl an den Innenwänden fortlaufend. Der Anteil des nicht reflektierten Lichts tritt in das Medium ein und wird je nach dessen Transparenz (Transmission-Koeffizient) entsprechend verlustbehaftet bzw. weit transportiert. Bestes Beispiel dafür ist die Glasscheibe. Beim Eintritt in das optisch dickere Medium ändert sich der Widerstand, der sich der Lichtwelle entgegensetzt. Zur Folge ändert sich entsprechend die Richtung des Lichtstrahls, er wird mit einem spezifischen Brechungswinkel abgelenkt. Gleiches passiert beim Wiederaustritt / Eintritt in ein weiteres Medium. Beispiel: jeder kennt das optisch verzerrte Abbild seiner Gliedmaßen, die sich unter Wasser befinden, während die Augen über Wasser sind. Die Beine bzw. Arme erscheinen größer, verzerrt und abgewinkelt.

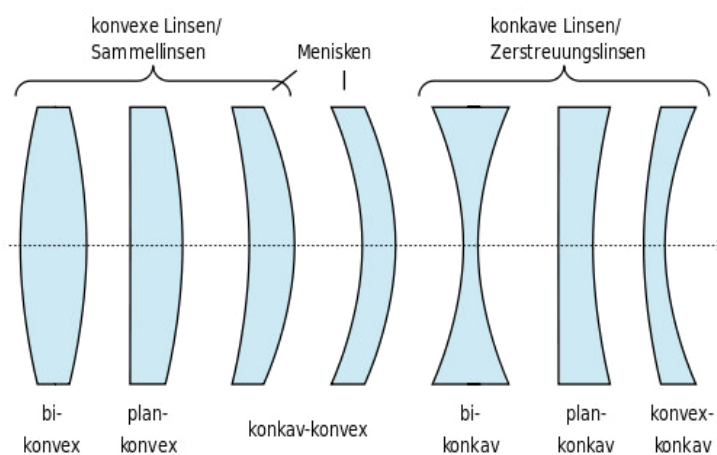


Abbildung 5.7.: Optische Sammel- und Streu-Linsen

5. LED-Optiken

Durch diese Brechungseigenschaften gelingt es mit Hilfe gewölbter Oberflächen Licht einzusammeln (Bsp. Brennglas) bzw. umgekehrt zu streuen. In optischen Linsen für LED-Leuchten werden verschiedene Bauarten oft in Kombination für verschiedene Zwecke eingesetzt.

5.2. Für LEDs optimierte Optiken

Die große Herausforderung für die Konstruktion von geeigneten Optiken besteht darin, das Licht der relativ kleinen Lichtquelle so zu lenken, dass erstens so wenig Licht wie möglich verlorengeht (Optische Effizienz), zweitens die Lichtfarbe nicht verändert wird bzw. keine Spektralfarben entstehen und drittens die Lichtverteilung für den gewünschten Zweck optimal hinsichtlich Größe der Beleuchtungsfläche und homogener Verteilung dort ist.

Große Hersteller bieten dafür ein breites Spektrum an optischen Lösungen an und besitzen eine diesbezüglich hohe Entwicklungs- und Fertigungskompetenz im LED-Bereich. Bekannte Player sind hier z.B. Carclo, FRAEN, Gaggione, Kathod, LEDil, LedLink, usw., die Produkte für die LEDs großer LED-Hersteller und Packager fertigen und LED-Retrofit und -Leuchtenhersteller versorgen.

Bei LED-Optiken sollte man nicht in erster Linie auf den Preis schauen. Wie im ganzen LED-Bereich zahlt es sich nie aus, auf besonders günstige Produkte zu setzen, da deren Qualität oft mit dem Preis korreliert. Die Optik so manch unbekannten Herstellers kann sich, das berichte ich aus eigener Erfahrung, obgleich rein äußerlich identisch mit entsprechenden Markenprodukten, im Einsatz als tatsächlich unbrauchbar herausstellen, z.B. weil sie Farb-Ränder, Spektral- oder Helligkeits-Linien, Schatten oder andere unerwünschte Effekte erzeugt. Generell müssen, auch beim Einsatz von sehr hochwertigen Optiken, alle optisch relevanten Bauteile der Leuchte gezielt aufeinander abgestimmt werden.

Die Hersteller-Angabe der Gesamt-Lumen (Total Effective Lumens) einer LED-Leuchte oder eines Retrofits berücksichtigt bei seriösen Herstellern alle Lichtverluste des Lichts auf dem Weg durch das optische System der Leuchte. Unseriöse Hersteller hingegen rechnen schon mal großzügig die Lumen-per-Watt Leistung des Chips mit der Ausgangsleistung hoch, um rein von den Zahlen besser dazustehen. Man kann den effektiven Lichtstrom, der sich nach der Optik ergibt, zwar theoretisch auch ohne Ulbrichtkugel bestimmen, in dem man ihn aus der Lichtstärke bei einem bestimmten Lichtaustrittswinkel entsprechend auf eine Kugelfläche hochrechnet, dies ist aber durch eine unterschiedliche Verteilung der Leuchtdichte i.d.R. sehr fehlerbehaftet, insbesondere wenn der Messwinkel klein ist und das Licht im Mess-

5.2. Für LEDs optimierte Optiken

bereich nicht ganz gleichmäßig verteilt ist. Für eine einheitliche Handhabung dieses Verfahrens schreiben die neuesten EU-Richtlinien deshalb für die Wertangabe bei gerichteten Strahlern (LED-Spots) die Lumenangabe auf der Verpackung für die Retrofit-Lampe als Werte nach der Optik und bezogen auf einen einheitlichen 45 Grad-Abstrahlwinkel vor, damit der Verbraucher diese Werte bei Lampen mit unterschiedlichem Abstrahlwinkel besser vergleichen können soll. Ob das wirklich hilfreich ist, muss ich allerdings bezweifeln, denn allein aus dieser Zahl wird sich keine qualitative Bewertung ableiten lassen. Außerdem ist die Angabe des Lichtstroms in Lumen per Definition unabhängig von der bestrahlten Fläche, also nicht wie die Lichtstärke winkelabhängig.

Mehr Licht heißt eben nicht unbedingt bessere Lichtverhältnisse. Viele LED-Spots, auch die von namhaften Herstellern haben wegen suboptimaler Optiken eine mangelhafte Helligkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Entfernung der Beleuchtungsfläche. Der Grund liegt oft darin, dass die 3, 4 oder mehr einzelnen LEDs, die den Lichtkegel eines Spots formen nicht gleichmäßig durch geeignete Überschneidung der einzelnen Linsen vermischt werden. So kann z.B. ein großer Teil des auftreffenden Lichts sichtlich mittig konzentriert sein. Die Hersteller für Retrofits haben es natürlich auch nicht leicht, da sie nicht ahnen können, in welcher Entfernung von der Lichtquelle das auftreffende Licht tatsächlich reflektiert wird. Deshalb gehen wohl die meisten von einem Einsatz als Deckenstrahler (Downlight) aus und nehmen die normale Deckenhöhe als Richtwert. Durchsichtige Optiken, und dazu zählen auch reine Lichtabdeckungen bzw. -gläser ohne Lenkungsaufgaben, verringern den sichtbaren Teil des ursprünglich erzeugten Lichtstroms nicht unerheblich, Verluste um die 10 Prozent sind normal. Bei opaken Lichtabdeckungen können die Verlustwerte auch leicht 25 Prozent und mehr, je nach spezifischer Lichtdurchlässigkeit erreichen.

Zusätzlich zu diesen Anforderungen an die Effizienz der Optik soll eine Blendung bei direkter Betrachtung der Lichtquelle ausgeschlossen oder wenigstens stark vermindert werden. Die Leuchtdichte von punktförmigen Lichtquellen, wie die von Leistungsfähigen LEDs, kann sehr schnell den „gesunden“ Bereich überschreiten. Jeder der schon mal ungeschützt in eine leistungsstarke LED geblickt hat, wird eine kurzzeitige Sehbeeinträchtigung durch die Blendung erlebt haben. In den Anforderungen der Beleuchtung am Arbeitsplatz ist auch der maximale Grad der Blendfreiheit vom Gesetzgeber vorgegeben. Bei niedrigen Decken geraten Leuchten relativ leichter in unser Blickfeld, auch wenn wir nicht gezielt an die Decke schauen. Gute Leuchten verhindern den direkten Blick in die ungeschirmte Lichtquelle mittels Licht-abschirmender Lichtlenkung, bzw. verhindern die Blendung durch reflektiertes Licht mit sehr hoher Leuchtdichte. Je niedriger der entsprechende

5. LED-Optiken

UGR-Wert (Unified Glare Rating) einer Leuchte, als Maß für die (psychologisch gewichtete) Blendung, desto höher ist entsprechend die Qualität des Lichts. Die Arbeitsstättenrichtlinien fordern z.B. für Räume mit Büroarbeitsplätzen UGR-Werte von kleiner gleich 19, man spricht in diesem Bereich auch von der „Komfortzone“. Die von den Leuchtenherstellern zu ermittelnde UGR-Werte werden entsprechend zu Klassen zusammengefasst:

UGR-Grenzwert	UGR-Klasse CIE	UGR-Klasse LiTG	Umschreibung der Blendwirkung
bis 13	A	A	kaum wahrnehmbar
bis 16	B	-	gut akzeptabel
bis 19	C	1	noch akzeptabel
bis 22	D	2	leicht unbehaglich
bis 25	E	3	schon unbehaglich
bis 28	F	-	leicht unerträglich
über 28	-	-	total unerträglich

Man unterscheidet LED-Optiken vom Begriff her, in der Reihenfolge ihrer Anordnung hinter der Lichtquelle, nach Primäroptik, Sekundäroptik und Tertiäroptik. Eine weitere Unterscheidung kann nach dem Material, z.B. Polymer-Kunststoff oder Glas, bzw. der Art und Weise der Lichtlenkung getroffen werden. Oft gelangen bereits in einer Optik mehrere Verfahren der Lichtlenkung zum Einsatz.

5.2.1. LED-Primäroptiken

Bereits die durchsichtige Kapsel der 2-Pin-LED erfüllt zwei Aufgaben: Schutz der LED und Funktion als Primäroptik, aufgrund ihrer gewölbten Oberseite. Durch die Wölbung wird das Licht Halbkugel-förmig, gleichmäßig verteilt abgestrahlt.

Viele moderne LEDs, wie z.B. SMD-Chips verzichten ganz auf eine Primäroptik, bei SMDs sorgt lediglich die Senke für eine Limitierung des Lichtaustritt-Winkels. Je nach Zweck werden erforderliche Sekundäroptiken und ggf. noch Tertiäroptiken

5.2. Für LEDs optimierte Optiken

eingesetzt. Ein Grund liegt in der Preispolitik für den LED-Chip.

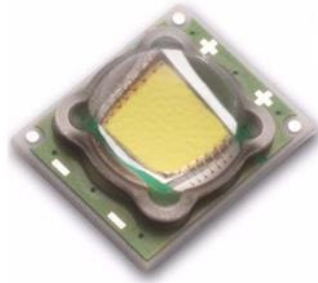


Abbildung 5.8.: Primäroptik auf SMT-Chip

Die Primäroptik findet sich hauptsächlich bei leistungsstarken Powerchips / SMT-Chips, wo sie die Lichteigenschaften der LED optimiert. Sie wird vom Chip-Hersteller gleich mit der LED und dem Gehäuse/Träger verbaut. Eine Primäroptik muss einen hohen Transmissionsgrad aufweisen, d.h. möglichst wenig der Lichtleistung soll beim Durchgang verloren gehen. Sie darf auch auf keinen Fall die Lichtfarben verändern, z.B. durch ihre Brechungseigenschaften. Ihre Aufgabe ist es, das Licht des Chips komplett einzufangen und für die sekundäre Optik in idealer Form zur Verfügung zu stellen. Man spricht hier von einem radialsymmetrischen Konzentrator. Das Material der Linse muss gegen Vergilbung, Hitze und Brüchigkeit widerstandsfähig sein. Die reinen Materialkosten der Primäroptik, die aus Polymer-Kunststoffen (z.B. PMMA, PC) in Spritzguss-Technik hergestellt wird, sind vernachlässigbar gering. Der Entwicklungs- und Fertigungsaufwand ist jedoch hoch, da in Ermangelung von standardisierten LEDs für jeden Chip eine exakt passende, individuelle Form gestaltet werden muss. Die kugelförmige Linse auf der Oberseite wird mit einem Diamant abgedreht, um optimale optische Eigenschaften zu erreichen.

5.2.2. Sekundäroptiken

Die Aufgabe der Sekundäroptik besteht darin, das von der LED bzw. dem Phosphor emittierte Licht mit geringstem Verlust dahin zu lenken, wo es in der Anwendung gewünscht wird. Bei einigen Anwendungen, wo die Leuchte einen asymmetrischen, mehr rechteckigen als runden Bereich sehr gleichmäßig und effizient ausleuchten soll, wird verständlich, dass dies nur mit dem Einsatz speziell dafür entwickelter Optiken möglich ist. Idealerweise ist der Sekundäroptik eine passende Primäroptik vorgeschaltet. Wenn nicht, muss der Sitz der Sekundäroptik auf der LED sehr passgenau sein, damit der volle Anteil des von der LED emittierten Lichts aufgenommen

5. LED-Optiken

und weitergeleitet wird. Von daher hat die speziell für diesen LED-Chip entwickelte Optik einen wesentlichen Vorteil gegenüber einer Universaloptik.



Abbildung 5.9.: Linsen-Reflektoren-Kollimatoren

Linsen aus Glas werden häufig als Universallinsen eingesetzt. Gegenüber Polymerkunststoffen hat Glas Vorteile hinsichtlich besserer Hitzebeständigkeit und Hitzeableitung (bessere Wärmeleitung), die aber für normale Beanspruchungen i.d.R. nicht zum Tragen kommen. Wegen des höheren Herstellungsaufwands fällt der Preis vergleichsweise höher aus. Sonderformen werden so nur nachgefragt, wenn Glas seine spezifische Vorteile für die Anwendung ausspielen kann.

Linse oder Reflektor? Beide Systeme haben ihre Vorteile. Mit einer Linse kann man den Lichtstrahl am genauesten ausrichten und lenken, da der gesamte Teil des abgestrahlten Lichts erfasst wird. Es besteht aber die Gefahr, dass Farbabweichungen oder Spektralfarben an den Randbereiche der Linse auftreten. Generell verhalten sich größere Linsen optisch treuer, wie Linsen mit relativ kleinem Durchmesser. Bei großflächigen COB-LEDs mit gruppierten LEDs macht es ab einer gewissen Chip-Fläche kaum noch Sinn, eine entsprechend große Linsen-Optik einzusetzen, deshalb greift man hier i.d.R. auf Reflektoren zurück. Gegen die auftretende Blendwirkung werden bei Bedarf Tertiäre Optiken eingesetzt.

Beim Reflektor wird nur der Teil des abgestrahlten Lichts erfasst, der von seinen Wänden reflektiert wird. Ein hochwertiger Reflektor hat eine optische Effizienz von bis zu 91 Prozent. Insgesamt ist seine Bilanz leicht besser als die einer Linse, da ein Teil des Lichts gar nicht reflektiert wird. Reflektoren gibt es in glatter Ausführung, oder mit kleinen Facetten versehen, die einzeln für sich als Spiegel wirken und somit je nach Ausrichtung eine weitere Lichtlenkung des Lichtstrahls erlauben. Als Material für LED-Reflektoren dient meist Kunststoff, der hauchdünn mit Aluminium metallisiert wird. Weil bei Linsen mit zunehmender Größe infolge des nötigen Krümmungswinkels eine gewisse Material-Dicke nötig wird, greift man bei größeren Linsendurchmesser zu einem Trick, der viel dünnere Bauweisen bei gleicher optischer Wirkung zulässt.

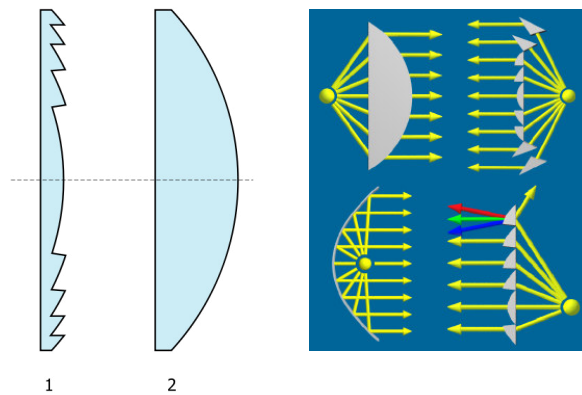


Abbildung 5.10.: Fresnel- und Hohl-Spiegel-Prinzip

Bereits 1822 hatte der Franzose Augustin Jean Fresnel die stufenförmige Linse für Leuchttürme entwickelt, um bei den riesigen Linsen dort Gewicht und Kosten zu sparen. Bei LED-Leuchten wird diese Bauart in Sekundär- und Primäroptiken wie z.B. Lichtabdeckungen eingesetzt. Die spezifischen Vorteile von Reflektoren und Linsen werden für moderne LED-Optiken kombiniert, um die Lichtstrahlen optimal auszurichten. In der Abbildung oben/vorher ist der Größenvergleich zwischen Original-Linse (2) und Fresnel-Bauart (1) veranschaulicht. Die rechte Abbildung verdeutlicht die wirksamen optischen Prinzipien.

Mit sogenannten TIR-Kollimatoren aus Polymerkunststoffen werden die dargestellten Effekte der Lichtlenkung erreicht. TIR steht für Total Internal Reflexion und bezeichnet das Prinzip, mit dem auch Lichtwellenleiter / Glasfaserkabel arbeiten. Ein Kollimator richtet das ungerichtet abgestrahlte Licht der LED (relativ) parallel aus. Der TIR-Kollimator besitzt i.d.R. einen Zentralbereich, durch den die Lichtstrahlen ungehindert durchgeleitet werden und einen peripheren Bereich, wo die auf die Seitenwände auftreffenden Lichtstrahlen gespiegelt und entsprechend weiter auf die Linsenfläche gerichtet werden. Wird die Optik Bauart- bzw. Größen-spezifisch für einen bestimmten LED-Chip hergestellt, erhält man ideale Bedingungen. Je nach gewünschtem Abstrahlwinkel ändert sich die Kollimator--Geometrie, z.B. Durchmesser, Winkel und Krümmung der Trichterwände, bzw. Krümmung der Lichtaustrittsfläche.

5. LED-Optiken

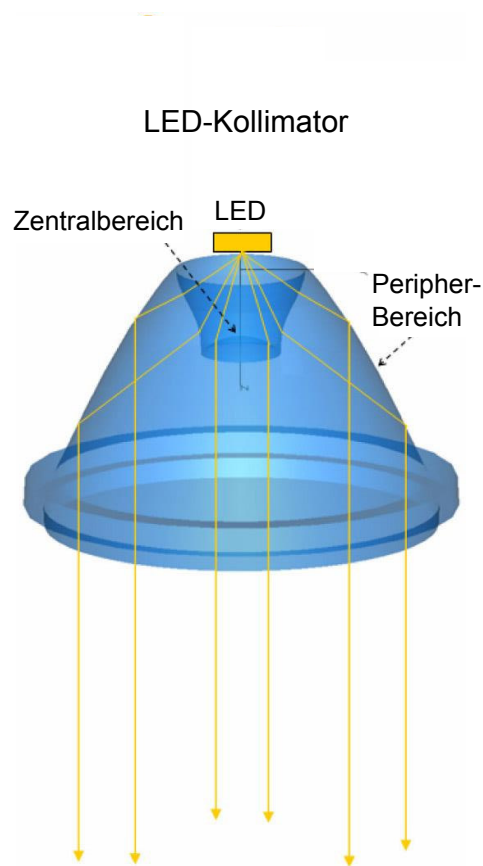


Abbildung 5.11.: Schema TIR-Prinzip beim LED-Kollimator

5.2.3. Tertiäre Optiken

Ein milchiges Lichtglas als äußere Abdeckung eines Downlights oder Spots stellt eine tertiäre Optik dar, da ein Teil des Licht zum Zwecke der Blendfreiheit diffus gestreut wird. Opake Lichtgläser haben aber den großen Nachteil, dass sie relativ viel des Lichtes absorbieren, je nach Grad der Opazität. Die speziell auf LEDs optimierten Scheiben weisen Lichtverluste von ca. 10 Prozent auf, bei konventionellen milchigen Streuscheiben aus Polycarbonaten (z.B. Makrolon) gehen die Verluste von 20 bis zu 50 Prozent. Der Einsatz solcher Materialien für LED-Beleuchtung macht im Sinne von Effizienz bzw. Energiesparen natürlich keinen Sinn. Wer also überlegt, ob sich die Umrüstung einer bestehenden Leuchte lohnt, muss auch den Verlustfaktor der bestehenden Optik einkalkulieren.

5.2. Für LEDs optimierte Optiken

Um die optische Effizienz zu steigern wurden winzige Facett-Linsen als Wabenstruktur entwickelt, man sagt dazu auch Mikrolinsen-Arrays. Mit den winzigen Linsenstrukturen auf der Oberfläche des Lichtglases, die je nach Formung der Linse das Licht entsprechend geordnet, symmetrisch oder asymmetrisch verteilen, wird damit neben der homogenen Lichtverteilung auch Blendfreiheit erreicht. Solche facettierten Scheiben können z.B. als auswechselbare Tertiäroptik der Leuchte, je nach gewünschter optischen Charakteristik in unterschiedlicher Ausführung, eingesetzt werden.



Abbildung 5.12.: Wabenstruktur auf Tertiäroptik

Wo keine tertiäre Optik vorgesehen ist, haben manche Sekundäroptiken, wie z.B. Kollimatoren, diese Mikrolinsen-Struktur bereits auf der Lichtaustrittsseite aufgebracht.



Abbildung 5.13.: Kollimator mit Mikrolinsen-Struktur

Zu den für die verschiedenen LED-Leuchtentypen spezifischen Optiken und daraus resultierenden Problematiken wird an späterer Stelle noch eingegangen.

Kapitel 6

Wärmemanagement bei der LED-Beleuchtung

Es ist wirklich von großer Wichtigkeit, die Wärme, die bei der Lichterzeugung der LED als Nebeneffekt immer entsteht, geeignet von der LED abzuführen, damit Licht- und Lebensleistung des Chips nicht beeinträchtigt werden. Je nach Effizienz des LED-Chips werden 20-30 Prozent des aufgenommenen Stromes in kaltes Licht umgewandelt. Es entsteht kein energiereiches, wärmendes Infrarotlicht, wie bei anderen Leuchtmitteln. Entsprechend werden die restlichen 70-80% komplett als Wärme an den Heatsink abgegeben.

Zum Vergleich:

Leuchtmittel	sichtbares Licht	Infrarotstrahlung	Abwärme
Glühlampe	8%	73%	18%
Leuchtstofflampe	20%	38%	42%
LED	20-30%	0%	Rest

LEDs neuester Generation steigern ihren Wirkungsgrad regelmäßig durch mehr Lumen-Output pro verbrauchtem Watt an Leistung, mehr Energie wird in Licht statt Wärme umgesetzt. Trotzdem entsteht immer Wärme. Ähnlich wie beim Computerchip verwendet man deshalb auch bei der LED-Beleuchtung einen geeigneten Kühlkörper aus Aluminium oder seltener Kupfer, der mit dem Chip einen wärmeleitfähigen Kontakt hat, dessen Wärme dadurch sehr schnell aufnimmt und effizient an die Umgebungsluft abführen kann. Im Idealfall ist das Design der kompletten Leuchte auf eine optimale Wärmeableitung ausgelegt.

6.1. Optimale Temperaturen für LEDs

Welche Bedingungen sind für diese optimale Wärmemanagement förderlich, welche ungünstig? Das hat wiederum mit Physik zu tun, deshalb werfen wir kurz auch einen Blick auf die Grundprinzipien der Wärmeleitung, um das besser zu verstehen. Zunächst betrachten wir das primäre Wärmemanagement, für das der LED-Chip-Hersteller / LED-Packager verantwortlich ist.

6.1. Optimale Temperaturen für LEDs

Zunächst fragt sich: Wie warm/heiß darf eine LED eigentlich werden? Die maximale Sperrschicht-Temperatur (Junction-Temperatur) liegt bei den meisten weißen LEDs zwischen 125 und 180 Grad C. Da man schlecht einen Messfühler in die Aktive Zone bringen kann, muss wenigstens direkt auf der Unterseite des Gehäuses/Chips gemessen werden.

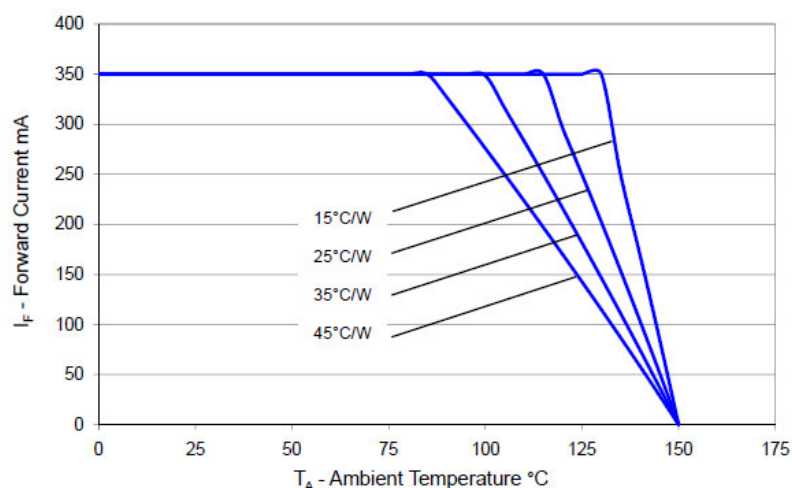


Diagramm: Maximaler Strom versus Temperatur, Temperaturlimit 150°C

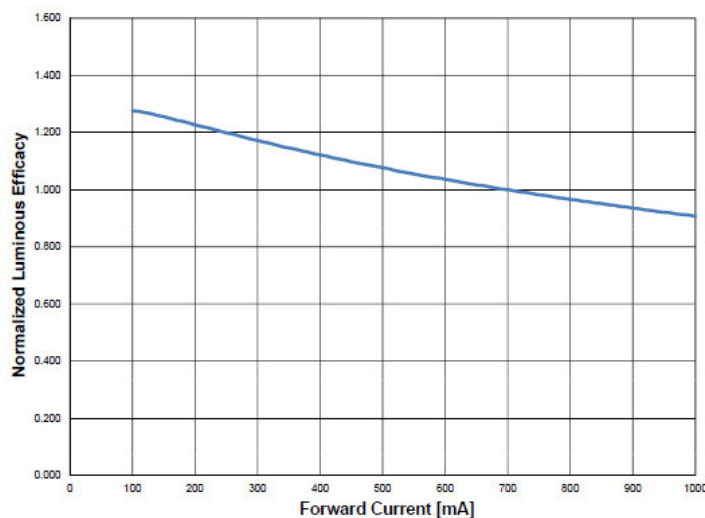
Abbildung 6.1.: Diagramm Temperatur-Strom Zusammenhang beim LuxeonRebel-Chip

Im Bild oben sieht man die Angaben zum typischen Hitze-Verhalten eines LUXEON - Chips: erreicht die Umgebungstemperatur eine Höhe von ca. 85° C und mehr,

6. Wärmemanagement bei der LED-Beleuchtung

kann die Hitze nicht mehr so effizient abgeleitet werden und der Stromdurchfluss vermindert sich entsprechend drastisch mit weiterer Temperaturerhöhung, was im Effekt durch eine drastische Abnahme der Lichtleistung in Erscheinung treten wird. Bei 150° C kann gar kein Strom mehr fließen, die LED kann beschädigt werden. Der Ort, an dem die meiste Hitze entsteht, ist der p-n-Übergang (junction) im LED-Halbleiter-Kristall, die sogenannte aktive Zone oder Sperschicht, denn hier werden als Folge des Stromdurchflusses die Photonen emittiert. Die Hersteller geben i.d.R. die dauerhaft maximal zulässige „Junction-Temperatur“ T_j an. Je geringer die Temperatur beim tatsächlichen Betrieb liegt, desto weniger wird die LED in physikalischer Hinsicht beansprucht und desto effizienter arbeitet sie. Dafür sind 1. die Umgebungstemperatur, 2. der Durchfluss-Strom und 3. die Effektivität der Hitzeableitung verantwortlich. Wenn viel Strom fließt, steigt entsprechend die Hitze im Chip. Da der Zusammenhang zwischen Stromstärke und Helligkeit aber unterproportional ist, spricht viel für ein Betreiben auf niedrigerem Energieniveau. Für die Temperaturerhöhung im Chip können auch andere Gründe wie die Erhöhung des Stroms verantwortlich sein, der Effekt bleibt gleich: Bei steigender Umgebungstemperatur kann kein ausreichender Abfluss der vom Chip erzeugten Wärme erfolgen.

In der nachfolgenden Graphik gibt der Hersteller für seinen LED-Chip die Degeneration der Effektivität an:



. Typical luminous efficacy characteristic vs. forward current, thermal pad temperature = 25°C.

Abbildung 6.2.: Einfluss des Betriebs-Stroms auf die Effizienz der LED

6.2. Einschub: Grundlagen bei Wärmeübertragung

Bei 100mA werden hier ca. 1280lm/W erreicht, bei 700mA ist die Effizienz der Lichtstrom schon auf 1000 Lumen gesunken. Da die Werte beim Binning unter 25° C erhoben wurden wird der reale Wert im echten Betrieb wegen der wesentlich höheren Temperaturen garantiert noch tiefer liegen.

Je besser jetzt die Wärme vom LED-Chip abgeführt werden kann, desto höher und stabiler die Lichtleistung der LED. Für eine lange Lebensdauer muss man die LED in einem stabilen und effizienten Temperaturbereich halten, damit ihre Lichtleistung möglichst lange gehalten werden kann. Die Lebensdauer bei einer LED ist so definiert, dass sie durchschnittlich nicht weniger als 70% der ursprünglichen Lichtleistung erreicht. Es ist also immer mit einer negativen Entwicklung zu rechnen, die Frage ist nur, ob die 70% der Ursprungsleistung nach 30.000 oder vielleicht bei 100.000 Stunden unterschritten werden. Aus diesem Grund sind die Angaben über die Lebensdauer, die dem Endverbraucher gegenüber gemacht werden mit Vorsicht zu genießen. Lampen- und Leuchtenhersteller können es sich nicht leisten, einen Lebenszyklus abzuwarten, um echte Werte anzugeben. Deshalb werden meist Schätzungen abgegeben, die aus kurzen Betriebszeiten hochgerechnet werden. Doch selbst das bedeutet einen hohen Aufwand, den sich leider so mancher spart, in dem er sich in unseriöser Art auf die Angaben des LED-Herstellers bezieht, um werbewirksame Effekte für den Endkunden zu erreichen. Große Hersteller versuchen die Sperrschichttemperatur im Normalbetrieb deshalb auf Werte um die 85° C einzugrenzen. Das technische Design wird z.B. auf den Betrieb mit Konstantstrom ausgelegt, um diesen Wertebereich halten zu können, mehr dazu an späterer Stelle.

6.2. Einschub: Grundlagen bei Wärmeübertragung

Wer beurteilen will, mit welchen Maßnahmen man die LED effektiv kühlen kann, d.h. den Wärmefluss weg vom LED-Chip steuern kann, muss wissen, welche primären physikalischen Prinzipien hinter diesen in ihrer Gesamtheit dann relativ komplexen Vorgängen stecken.

Physikalisch könnte man Wärmeübertragung so definieren: Bei der Übertragung von Wärme wird thermische Energie von A nach B transportiert. Dieser Transport der Wärmeenergie kann auf drei unterschiedliche Weisen erfolgen:

6.2.1. Wärmetransport durch Wärmeleitung (Konduktion)

Wärmeleitung findet in Stoffen mit mittlerer bis fester Dichte statt. Vom Ort der höheren Temperatur wird die Energie zum Ort mit relativ niedriger Temperatur abgeleitet, wobei die Materie insgesamt ortsfest verbleibt. Die Atome oder Moleküle

6. Wärmemanagement bei der LED-Beleuchtung

geraten durch die Energie in Bewegung und schwingen irgendwann so stark, dass sie benachbarte Atome oder Moleküle ebenfalls zum Schwingen bringen. Diese Welle pflanzt sich weiter fort, wobei die Schwingungsenergie mit der Strecke abnimmt. Je nach Struktur der Materialien besitzen sie eine spezifische, d.h. unterschiedliche, von der Temperatur abhängige Wärmeleitfähigkeit.

Die physikalische Einheit für die Wärmeleitfähigkeit λ ist Watt (W) je Temperatur in Grad Kelvin (K) und Distanz in Meter (m).

Stoff bei 0°C (273,15°K) u. Stoffreinheit	Wärmeleitfähigkeit λ
Luft	0,026
Polystyrol (Styropor)	0,17
Holz je nach Holzart	0,10 - 0,20
Epoxidharz	0,20
Gipskartonplatte (Standard)	0,25
Beton	2
Wärmeleitpaste	10
Aluminiumoxid (Saphir)	28
Eisen	80
Aluminium	236
Gold	314
Kupfer	401
Silber	429

6.2.2. Wärmetransport durch Konvektion

Konvektion ist Wärmeübertragung vom Ort der höheren Temperatur zum Ort der niedrigeren Temperatur mit Materialtransport des Mediums (d.h. im Vakuum kann keine Konvektion stattfinden, da keine Teilchen vorhanden sind). Es muss sich also um leicht bewegliche Stoffe wie Flüssigkeiten oder Gase handeln, in denen die gespeicherte Wärmeenergie der sich bewegenden Atome/Moleküle durch Strömung transportiert wird. Die Strömung kann durch einen Impuls von außen initiiert werden (Bsp. Ventilator) oder durch entstehende Dichteunterschiede (bei Wärme dehnen sich Stoffe aus) im Medium entstehen. (Bsp. Warme und kalte Luftschichten, Heißluftofen, etc.)

6.2.3. Wärmeübertragung durch (Temperatur-) Strahlung

Bei der Temperaturstrahlung handelt es sich um elektromagnetische Strahlung im nicht-sichtbaren Bereich, z.B. Infrarotstrahlung. Die Strahlung besteht hier genau wie die sichtbare Strahlung aus Photonen, erfordert also kein Medium, sondern breitet sich auch im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit aus (Bsp. wärmende Sonne). Je heißer ein Körper ist, desto mehr Photonen werden abgegeben und desto mehr Wärmestrahlung erfolgt. Schwarze Körper strahlen mehr Wärme ab und nehmen mehr Wärme auf, als weiße Körper.

In vielen Fällen sind mehrere Wärmeübertragungsarten beteiligt, z.B. beim Heizkörper oder Kachelofen. In letzterem wird die Wärme vom inneren Brennraum nach außen zu den Kacheln mittels Wärmeleitung geleitet, bei größeren Öfen zusätzlich über Konvektion in Luftkanälen. Die so erhitzten Kacheln geben die Wärme über Konvektion weiter an die Raumluft ab und über Strahlung an andere Körper weiter.

Negativ-Beispiel: Bitte nicht mit Induktiver Erwärmung verwechseln, denn letztere erfordert keine der drei genannten Wärmeleitarten, da gar kein Transport von Wärmeenergie zwischen Herd und Topf stattfindet. Vielmehr werden, z.B. beim Induktionskochfeld, durch Wechselstrom sich verändernde Magnetfelder aufgebaut, die einen Wirbelstrom im Topfboden induzieren, wodurch wegen des hohen elektrischen Widerstandes der Eisen-Teilchen im Topfboden (im Gegensatz zum geringen Widerstand der Hochfrequenz-Kupferspule unter der Herdplatte) dieser zur Erwärmung gebracht wird. Es findet also eine Umwandlung elektrischer Energie in magnetische Energie und wieder zurück statt. Die Wärmeleitung beginnt erst im Topfboden selbst.

6.3. Wärmeübertragung bei der LED

Im Gegensatz zur Glühlampe entsteht bei der LED keine Infrarotstrahlung, Lumineszenzstrahler geben, wie ihr Name bereits sagt, nur kaltes Licht ab. Man kann den Unterschied auch spüren, wenn man seine Hand über eine LED-Lichtquelle hält. Die Wärme, die in der aktiven Zone entsteht wird zunächst durch Wärmeleitung in die relativ kühleren Zonen des Halbleiters weitergeleitet und dann an die angrenzenden Medien weitergeleitet. Der Substratträger (Saphir) wird dabei genauso wie sein Chipgehäuse bzw. Chipträger (Aluminium, Keramik, Kunststoff,...), und auch weitere z.B. direkt aufgebrachte Materialien wie Phosphor oder eine Epoxidharz-Kapsel / Silikonschicht selbst erhitzt. Angrenzende, relativ kühleren Luft wird an ihren Grenzflächen erwärmt und durch Konvektion wird die erwärmte Luftschicht mit kühleren Schichten ausgetauscht, was im Effekt dann wegen der Energieabgabe zu einer kontinuierlichen Kühlung aller zuerst genannten Materialien führt.

Blickt man auf die Wärmeleitwert-Tabelle oben wird ersichtlich, mit welchen Stoffen die Hitze besonders gut abgeführt werden kann, damit LED und Phosphor nicht leiden. Weil beim Betrieb der LED immer neue Wärme/Hitze entsteht, ist es für alle leistungsfähigen LEDs sehr wichtig, dass die Wärme von der LED durchwegs effektiv weggeführt wird. Die Wärme muss unbedingt nach unten an Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit abgegeben werden, da die Luft als angrenzendes Medium relativ gut isoliert, d.h. die Wärmeübertragung an der Grenzschicht wegen des relativen geringen Wärmeleitwertes der Luft prinzipiell suboptimal ist. Zwischen den verschiedenartigen Materialien muss eine luftfreie Verbindung gewährleistet sein, die nicht weiter isoliert. Bei leuchtkräftigen LEDs hat sich ein Kühlkörper, mit Fachbegriff „Heatsink“ (engl. Hitze-Abfluss) aus Aluminium zur gezielten Wärmeabführung durchgesetzt. Der Chip wird mit einer Wärmeleitpaste oder wärme-leitfähigen Klebeschicht damit verbunden. Kupfer hat zwar eine noch höhere Wärmeleitfähigkeit als Aluminium, ist aber entsprechend wesentlich teurer und nicht so einfach zu formen.

6.4. Primäres Wärmemanagement bei der LED

Alle Bauformen haben bestimmte Design-Vorteile und -Nachteile, die der Hersteller hinsichtlich der Wärmeleitungseigenschaften optimieren muss.

6.4. Primäres Wärmemanagement bei der LED

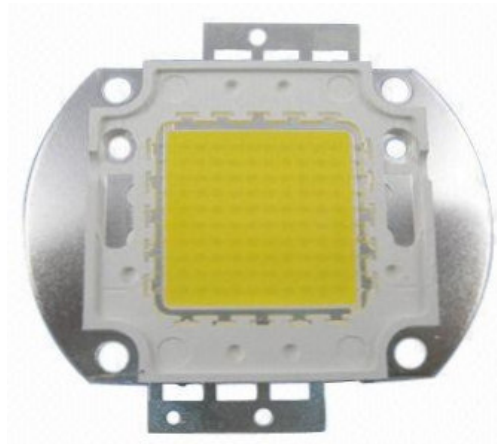


Abbildung 6.3.: COB-LED auf Aluminium Trägerplatte

Besonders lichtstarken Power-LEDs, oder die COB-LEDs mit ihrer hohen LED-Dichte auf engem Raum sind auf eine exzellente Wärmeableitung angewiesen, da sie viel Hitze abgeben und insbesondere die innen liegenden LEDs sonst schnell degradieren würden.

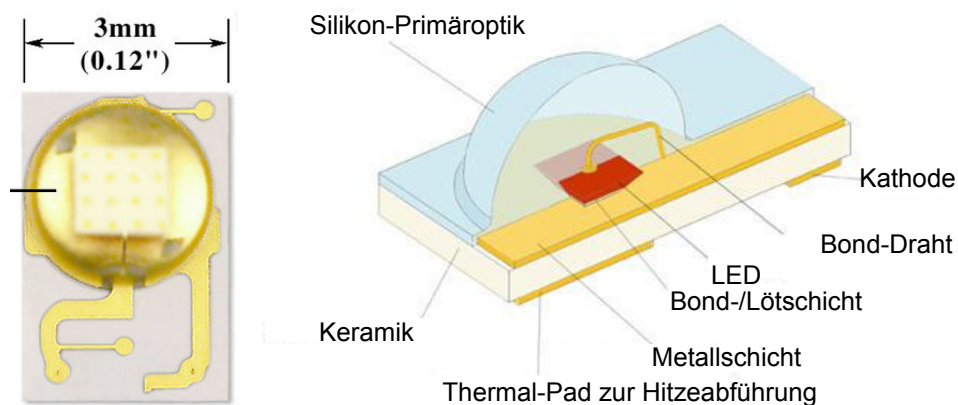


Abbildung 6.4.: Design für Heatmanagement im Chip Bsp. Luxeon-Rebel

Der mit Silikon gekapselte LED-Chip ist im Bild oben auf ein Keramik-Plättchen aufgebracht. Keramik hat eine relativ gute Wärmeleitfähigkeit, so kann die Wärme

6. Wärmemanagement bei der LED-Beleuchtung

der LED effizient nach unten weitergeführt werden.

Für SMD-LEDs gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Hitzeableitung sicherzustellen. Eine davon benützt die Kupfer-Kontakte als Wärmeableiter, mit denen der Chip auf ein PCB gebondet wird.



SMD-Chip mit Lead-Frame-Design zur Wärmeabfuhr am Bsp. Osram

Abbildung 6.5.: Osram SMD mit Lead-Frame

Bei dem leistungsstarken SMD-Chip im nächsten Bild ist das Gehäuse-Material zwar aus Kunststoff, einem schlechten Wärmeleiter, weil aber bereits ein kleiner „Slug“ aus Kupfer implementiert ist, ist die Ableitung der Wärme nach unten durch den internen Heatsink an den externen Heatsink möglich.

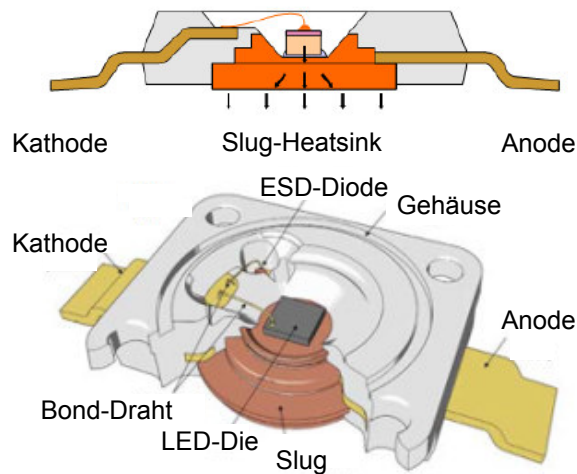


Abbildung 6.6.: Heat-Slug im Osram PowerChip

6.4. Primäres Wärmemanagement bei der LED

Wird die LED bzw. ihr Gehäuse auf eine Platine aufgebracht, muss auch deren Design die Wärmeleitung zulassen. Dies geschieht durch Wärmekanäle (Vias).

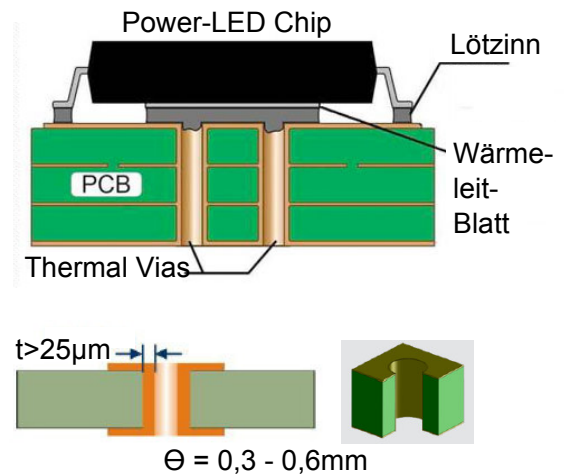


Abbildung 6.7.: Schema einer Thermal-Vias zur Wärmeabführung

Über eine Wärme ableitende Metallbeschichtung in Platinen-Löchern wird in der Abbildung unten die thermische Verbindung zum Heatsink hergestellt.

Wenn sehr starke LEDs verwendet werden, reicht diese Art der Wärmableitung aber nicht mehr aus. Der Hersteller greift dann auf sogenannte „Metal-Core“-PCBs (MCPCBs) zurück, also Platinen, die wie der SMD-Chip aus dem Beispiel oben einen Metallkern integriert haben.

Im Bild unten ist eine weiß beschichtete MCPCB mit großflächigen Kupfereinschlüssen in der obersten Schicht für die Aufnahme von drei Power-LED-Chips und elektronische Bauteile zu sehen. In der untersten Schicht sorgt Aluminium für eine gute Wärmeableitung an den Heatsink nach unten. Dazwischen befindet sich eine Schicht laminiert, die zwar den Strom isoliert, aber gute Wärmeleiteigenschaften hat, wie das z.B. Keramiken tun. Der Platz auf der Platinenoberseite wird auch zur Wärmeleitung genutzt. Mit breiten Kupferbahnen wird die Wärme weg vom Chip geführt, damit durch zusätzliche Konduktion Wärme an die Luft über der MCPCB abgegeben werden kann.



Abbildung 6.8.: Kupferflächen einer MCPCB als Bond-Möglichkeit und Heatsink

6.5. Heatsink-Design

Heatsink-Design ist in aller Regel ein essentieller Bestandteil des äußerst wichtigen Heat-managements.

Frage: Wie sieht eigentlich der ideale Kühlkörper aus?

Antwort: Der ideale Kühlkörper ist so konstruiert und dimensioniert, dass er die Gesetze der Physik bei der Wärmeübertragung berücksichtigt...

Betrachten wir zuerst rein Größen-mäßig / mathematisch den bezüglich der Wärmeleitung von Jean-Baptiste Joseph Fourier bereits im Jahre 1822 formulierten Zusammenhang, nach dem sich grundsätzlich die Leistung der von einem massiven Feststoff-Körper übertragenen Wärme berechnen lässt:

$$Q = \lambda : d \cdot A \cdot (T_{W1} - T_{W2})$$

Q	sei die Wärmeübertragungsleistung in Watt
λ	der Wärmeleitwert
A	die von Wärme durchströmte Fläche
d	sei die Dicke des Körpers bzw. die beim Wärmetransport zurückzulegende Strecke
T_{W1}	die Temperatur der wärmeren Schicht und
T_{W2}	die Temperatur der relativ kälteren Schicht

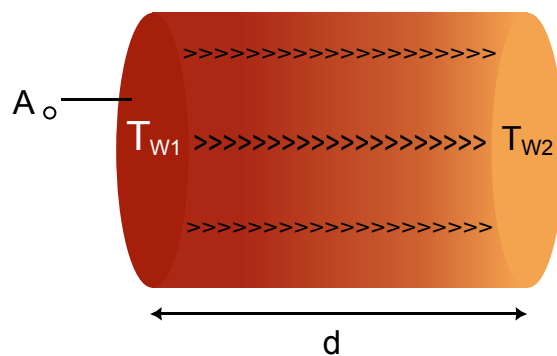


Abbildung 6.9.: Fourier-Prinzip der Wärmeleitung

Folgerungen aus der Gleichung für das optimale Design:

Faktoren im Zähler wirken sich direkt proportional auf die Wärmeübertragungsleistung aus:

1. Je größer der spezifische Wärmeleitwert (λ) des Heatsink-Materials (bei gegebener Heatsink-Geometrie), desto mehr Wärmeleistung kann somit übertragen werden!
2. Je größer die Oberfläche (A) des Heatsinks (bei konstanter Temperaturdifferenz = Hitze- Entwicklung), desto besser!

Faktoren im Nenner wirken sich indirekt proportional (reziprok) auf die mögliche Wärmeübertragung aus:

3. Je geringer die Dicke (d) des Heatsink-Materials ist, bzw. je kürzer der bei der Leitung zurückzulegende Weg bis zur kühleren Fläche ist, desto besser!
4. Je früher die Finnen ansetzten, d.h. je kürzer die Übertragungs-Distanz (d) desto besser!

6. Wärmemanagement bei der LED-Beleuchtung

5. Entsprechend ist ein kurzer, breiter Heatsink besser, als ein langer schmaler! Punkt eins ist schon geklärt: Aluminium findet die meiste Verwendung, da es günstiger als Kupfer ist und industriell einfacher zu formen. Die geforderte große Fläche aus Punkt 2 erreicht man, in dem man z.B. Kühlrippen / Finnen verwendet, die die gesamte Oberfläche des Kühlmaterials vergrößern und die nach Punkt 3 möglichst dünn sein sollten...

Die erwärmte Heatsink-Oberfläche (Kühlrippen) gibt die Wärme an die umgebende Luft ab. Nur wenn die Umgebungstemperatur wesentlich kühler ist, kann der Heatsink überhaupt effektiv arbeiten. Je kühler diese Luft im Vergleich zur Kühlkörperoberfläche desto besser der Wärmetransport über die Konvektion. Oft wird aber der Fehler gemacht, dass z.B. der elektrische Konverter/Trafo wegen seiner zu großen Nähe und Eigenschaft, selbst Wärme zu erzeugen, die Luft bereits vorwärmt. Der Kühl-Effektivität wird so entscheidend gemindert. Darum sollte die Treiberelektronik möglichst weit von dem LED-Chip entfernt positioniert sein!. Auch muss durch eine geeignete Geometrie von Lampe oder Leuchte sichergestellt werden, dass der Luftaustausch von erwärmter und noch relativ kälterer Luft genügend schnell stattfinden kann.

Entscheidend für die gute Wärmeübertragung ist die Materialauswahl beim Aluminium, denn es handelt es sich nicht um reines Alu, sondern aus Gründen der verfahrenstechnischen Herstellung stets um eine Aluminium-Legierung, d.h. eine Verbindung aus Alu und anderen Metallen, die i.d. R. einen geringeren Wärmeleitwert erzielt. Je nach Herstellungsverfahren, ob durch Strangpressverfahren (Extrusion) oder Druckguss (Moulding) werden unterschiedliche Legierungen benötigt. Für eine gute Wärmeleitfähigkeit bei Extrusionsprofilen wird Al 6063 empfohlen, für den Verguss entsprechend Al ADC 6. Von beiden hat Aluminium 6063 den besseren Wärmeleitwert, deshalb sind Extrusions-Kühlkörper die bessere Wahl. Ihr Einsatz ist aber begrenzt, da mit Druckguss viel variablere Formen geschaffen werden können, der Kühlkörper z.B. so auch eine Einheit mit Lampengehäuse oder Leuchte bilden kann. Ein weiterer Nachteil des gegossenen Kühlkörpers zur Extrusion ist seine größere Dicke der Kühlrippen und demzufolge relativ geringere Gesamtoberfläche bei gleicher Kühlkörpermasse. Mehr Rippen/Finnen bedeutet demzufolge mehr Platzbedarf und größeres Gewicht.

Die Wärmeübertragung via Strahlung spielt bei LED-Heatsinks im Vergleich zur Wärmeleitung eine untergeordnetere Rolle. Dennoch wirkt sich z.B. ein schwarzer statt weißer Heatsink besser auf das Abstrahlverhalten aus. Versuche zur Oberflächenbeschaffenheit von Kühlkörpern zeigen, dass das rohe Aluminium, schlechtere Wärmeübertragungswerte durch sein Abstrahlverhalten an die Luft besitzt, als wenn

die Oberfläche eloxiert (anodized) ist, oder mit einer speziellen Wärmeleitfarbe überzogen ist. Das verursacht natürlich weitere Kosten bei der Herstellung, lohnt sich aber, wie die unten stehende Tabelle zeigt, wo verschiedene Oberflächenarten mit einem idealen Wärmestrahler verglichen werden.

Oberflächenbeschaffenheit:	Emissionsgrad:
Aluminium poliert:	0,04
Alu aufgeraut:	0,07
Alu mit Wärmeleit-Coating:	0,27 – 0,67
Alu silbern eloxiert:	0,77
Alu schwarz eloxiert:	0,79
Referenz: Schwarzer Strahler:	1

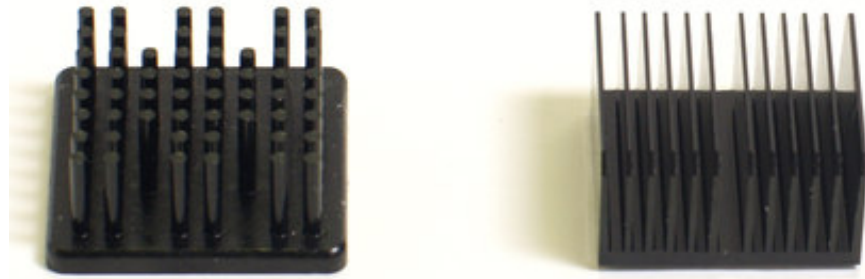
Die Bedeutung in der Praxis:

Die richtige räumliche Orientierung des Heatsinks bzw. die Orientierung seiner Kühlrippen ist sehr wichtig. Der einfache Grund: heiße Luft steigt nach oben! Werden die Kühlrippen wie leider oft gesehen horizontal angeordnet (oder Spot kann so positioniert werden, dass Kühlrippen horizontal stehen..) macht das keinen Sinn, der Luftaustausch nach oben wird behindert. Schließlich muss die in den Kühlrippen erwärmte Luft ohne Behinderung auch schnell nach oben aus der Lampe-Leuchte austreten können. Wer also einen zwar gut konzipierten Heatsink dann aber derart gekapselt/verdeckt in eine Leuchte einbaut, dass die Luftableitung, d.h. gesamte Konvektion behindert wird, hat im Ergebnis trotzdem ein großes Problem.

Große Leuchten- und Lampenhersteller führen deshalb aufwendige thermodynamische Berechnungen zur Bestimmung des optimalen Heatsinks und seiner idealen Wärmegeometrie durch und testen die zunächst errechneten Ergebnisse am Prototyp mit Wärmebildkameras, auch in verbautem Zustand. Wer vorher schon per Berechnung und Simulation ungeeignete Designs ausschließen kann, spart Zeit und Geld. Wer keine Berechnungen anstellen kann muss den langen Weg gehen und unter Berücksichtigung der hier genannten Zusammenhänge und entsprechend umgesetzten Anordnungen durch Ausprobieren und Testen brauchbare Designs ermitteln.

Das Bild unten zeigt zwei typische Heatsink-Ausführungen. Beide haben eine relativ dünne Basisplatte für kurze Wege zu den Kühlorganen. Links führen Pins die Hitze an die Umgebungsluft ab, rechts sorgen Finnen dafür. Stellt man sich vor, dass die LED mit einem geeigneten wärmeleitenden Material jeweils auf der Unterseite

6. Wärmemanagement bei der LED-Beleuchtung



Die Qual der Wahl: >Pins or Fins> (Nadel/Stachel oder Finnen)?

Abbildung 6.10.: Heatsink-Formen: Nadel oder Finne

beider Heatsinks befestigt wird, um entsprechend nach unten zu leuchten, wäre das rechte Design mit den Finnen besser geeignet, da zwar bei beiden die erwärmte Luft schön nach oben entweichen kann, die Finnen aber eine relativ größere Oberfläche haben und dünner sind. Das linke Design mit den Pins eignet sich aber z.B. besser, falls der Heatsink um 90 Grad gekippt wird, die LED horizontal nach der Seite abstrahlen sollte. Denn dabei würden die Fins im rechten Design im ungünstigsten Fall horizontal verlaufen und die Hitzeabführung der erwärmten Luft nach oben wäre behindert. Mit den Pins ginge das aber trotzdem noch, sie ermöglichen in jeder Lage den Aufstieg der erwärmten Luft... Entsprechend ist der optimale Kühlkörper in seiner Beschaffenheit stets seinem spezifischen Einsatz abhängig und sollte daraufhin optimiert werden.



Abbildung 6.11.: MR16-Heatsink-design

6.6. Aktive vs. Passive Kühlung und thermisches Leuchtendesign

Die Idee, durch aktive Kühlung, z.B. mittels eines Ventilators, die natürliche Konvektion durch eine erzwungene, steuerbare Konvektion zu ersetzen und damit positiv in das thermische Management einzugreifen ist erst einmal naheliegend. Einige Hersteller haben diesen Schritt für Downlights im Profi-Bereich getan, andere auch für Spots zur Haushaltsbeleuchtung gewagt. Hier gibt (oder bald gab) es z.B. kleine Retrofit-LED-Spots mit integriertem Ventilator. Die Idee dahinter ist, dass man dem Wunsch nach noch leistungsfähigeren Spots Rechnung tragen kann, auch wenn die begrenzten vorgegebenen Abmessungen der Lampe gar keinen ausreichend großen Heatsink zulassen.

Aus eigener Praxis, kann ich aber berichten, dass die akustischen Schwingungen, die so ein Ventilator erzeugt, sei er auch noch so unauffällig, weil klein und leise, zu unvorhersehbaren, drastischen Geräuschentwicklungen führen können. Das hat mit der akustischen Problematik von Eigenschwingung und Interferenz, beim Einsatz von mehreren Spots/Lüftern, zu tun. Diese Spots werden eben häufig in abgehängte Decken eingebaut, einem idealen Resonanzkörper für die Multiplikation der akustischen Einzelschwingungen. Ventilatoren haben außerdem, auch wenn sie noch so gute Kugellager besitzen, die Eigenschaft, durch elektrostatische Anziehung und Luftverwirbelung Staub anzuziehen, der die Effizienz durch seine isolierende Wirkung bald herabsetzt und ungewünschte Verschmutzung erzeugt. Man kennt das Problem vom PC-Lüfter. Eine mögliche Flüssigkeitskühlung ist i.d.R. wegen des aufwändigen Designs und der Kostenproblematik nur für Sonderleuchten erwägenswert.

Deshalb rate ich von Ventilator-unterstützter Kühlung für übliche Beleuchtungszwecke im Privatbereich auch ab und ermutige zu einem guten passiven Design des Heatsinks, bei dem der ausreichend effektive Kühlkörper zusätzlich so weit wie möglich vom Gesamt-Design der Leuchte unterstützt wird.

Der Kreativität beim Lampen- respektive Leuchtendesign sind somit auch mit optimalem thermischen Management gewisse physikalische Grenzen gesetzt, in Abhängigkeit von der Effizienz des verwendeten LED-Chips. Wer ein gutes thermisches Management von Haus aus vernachlässigt, hat den Schadensfall damit vorprogrammiert. Einige Billigprodukten im LED-Bereich werden leider viel zu heiß, und so muss man dann von einer relativ geringen Lebensdauer der LED ausgehen.

In vielen Fällen, werden die hier angesprochenen Implikationen im Praxiseinsatz leider nicht ausreichend bedacht. Allzu häufig werden z.B. in die Decke eingebaute

6. Wärmemanagement bei der LED-Beleuchtung

Halogen-Strahler eins zu eins durch entsprechend starke LED-Retrofits oder Downlights ersetzt. Je kleiner die Konvektionsflächen auf der Gehäuseunterseite der Leuchte und je geringer die Konvektionsmöglichkeiten im Deckenausschnitt selbst, desto mehr Potential für Probleme ergibt sich...



Abbildung 6.12.: Konvektionsmöglichkeiten beim Deckenspot

Leistungsfähige Spots neuester Generation mit 7 und mehr Watt werden aber relativ heiß. Der eigentliche Spot besitzt zwar i.d.R. einen Kühlkörper, wenn die zur Kühlung nötige Luft aber aus Platzmangel nicht ordentlich zirkulieren kann, die Wärme-Konvektion nach oben und der Seite ausfällt, bleibt die Wärmeableitung auf den runden Lüftungsspalt und das Metall des Leuchtengehäuses beschränkt, das hoffentlich eine sehr gute Verbindung zum Spot besitzt.. Der komplette Ausfall durch Zerstörung der LED ist eher selten, auch wenn die Lebenserwartung durch Überhitzung rapide sinkt. Was aber relativ schnell passiert ist, dass die Lichtleistung abnimmt und die Vorschalt elektronik durch Überhitzung Schaden nimmt und ausfällt. Dies macht sich zuerst durch Flackern, dann durch Ausfall wegen Unterbrechung der Stromzufuhr zum Chip z.B. aufgrund zerstörter Kondensatoren bemerkbar.

6.7. Intelligentes Heat-Management

Es gibt noch einen weiteren Weg, das Wärmemanagement zu unterstützen: mit Hilfe intelligenter Technik wird die Erwärmung der LED kontrolliert. Das kann auf vielfältige Weise erreicht werden. Dafür werden Mikrocontroller eingesetzt, das sind kleine Rechenchips, die die Veränderung bestimmter Parameter kontrollieren und regeln.

6.7.1. Hitze-Regelung mit einem „Voltage-Output Temperature Sensor“

Wie wir gelernt haben, verändert die am LED-Chip anliegende Stromspannung die Wärmeentwicklung und umgekehrt vermindert eine ansteigende Hitze die Spannung. Dieser Umstand wird ausgenutzt, um einen relativen Hitzeanstieg durch einen entsprechenden Spannungsabfall festzustellen. Der Mikrocontroller reagiert darauf, in dem er die Leistung, z.B. durch PWM-Dimmung (mehr dazu später), kurzzeitig leicht mindert, um eine Abkühlung einzuleiten, damit die T_{j-max} nicht überschreiten wird, bzw. der Kunde keinen Lichtverlust bemerkt.

6.7.2. Hitze-Regelung mit einem „Mixed-Signal Controller“

Für Displays und hochwertige Beleuchtung werden auch relativ teurere Mixed-Signal-Controller, die mehrere LEDs, auch mit unterschiedlichen Binnings / Weißfarben, überwachen können eingesetzt. Sie messen nicht nur die Spannung, sondern auch die Stromstärke am Chip und die Leiterplatten-Temperatur und berechnen daraus die aktuelle Lichtfarbe der einzelnen Chips, um diese entsprechend nachzuregeln und so einen homogenen Lichteindruck in einem festgelegten Parameterbereich zu gewährleisten.

6.7.3. Regelung mit Farbsensoren

Dies stellt die teuerste und genaueste Regelungsoption dar, da die tatsächliche Farbwiedergabe nachgeregelt werden kann. Das Lichtspektrum der LED wird von einem oder besser mehreren Sensoren ständig überwacht und falls sich eine spektrale Farbverschiebung/Änderung zum Sollwert einstellt, werden die Leistungsparameter nachgeregelt. Dies ist gar nicht so trivial, denn bei der Steuerung von vielen LEDs kommt es z.B. auf den richtigen Sitz der Farbsensoren an wie auch auf eine unterschiedliche Steuerbarkeit der einzelnen LEDs. Zusätzlich sind auch hier die Farbsensoren mit einer spezifischen Temperaturüberwachung an Chip, Platine und Umgebung gekoppelt.

Kapitel 7

Betreiben und Ansteuern der LED

LEDs sind wie alle anderen modernen Leuchtquellen mit Strom zu betreiben. Im Gegensatz zur guten alten Glühlampe, die man direkt mit Haushaltsstrom betreiben konnte, würde eine LED bei so hohen Spannungen aber sofort zerstört werden. Der Arbeitsbereich zwischen Durchlassspannung, d.h. der nötigen Mindestspannung, ab der die LED überhaupt zu leuchten beginnt, und der maximalen Vorwärtsspannung ist relativ eng und hängt vom verwendeten Halbleiter und seiner Dotierung ab. Für die meisten blauen und somit weißen LEDs liegt diese Flussspannung (U_F) bei ca. 3,3 bis 4 Volt. Bei Spannungen ab 5 V wird eine (einzelne) LED physikalisch zerstört. Bei roten, gelben und grünen LEDs liegt die Flussspannung zwischen 1,9V und 3,4 V.

Wegen ihrer typischen Charakteristik für eine Halbleiterdiode zählt die LED nicht zu den Ohm'schen Verbrauchern, d.h. die beiden Größen Spannung und Stromstärke verhalten sich bei Veränderungen nicht linear zueinander. Wir erinnern uns an die Strom-Spannungskennlinie der LED (Kapitel „Elektrisches Verhalten..“) bzw. ihren sehr steilen Anstieg im Bereich der Flussspannung. Deshalb erfordert das Betreiben der LED meist einen etwas größeren technischen Aufwand, der aber mit den Mitteln der Elektronik bzw. ihren Standard-Bauteilen und -Schaltungen gut in den Griff zu bekommen ist.

Nachdem jetzt so viel von Spannung die Rede ist, will ich kurz auf die immer wiederkehrenden elektrotechnischen Grundbegriffe wie Spannung, Stromstärke oder Widerstand eingehen, damit auch der elektrotechnische Laie sich etwas mehr unter diesen doch recht abstrakten Bezeichnungen vorstellen kann. Das elektrotechnische Basiswissen, z.B. bzgl. Ohm'sches Gesetz, Eigenschaften von Reihen- und Parallelschaltung, ist wirklich grundlegend für den Betrieb von LEDs und sollte von jedem beherrscht werden, der nicht nur fertige Systeme/Lösungen ans Stromnetz anschließt.

7.1. Einschub: Elektrotechnische Grundlagen

Frischen wir noch mal die elektrischen Grundgrößen und Zusammenhänge auf, die für die Ansteuerung der LEDs von Bedeutung sind:

7.1.1. Spannung (U)

Im Kapitel „Elektrische Leitfähigkeit“ haben Sie gelesen, dass der Strom in einem Leiter dann fließen kann, wenn ein Spannungspotential, durch Ladungstrennung zwischen dem Minuspol und dem Pluspol, anliegt. Sie haben im Rahmen des Atom-Modells auch erfahren, dass die Dinge auf dieser Welt eigentlich bemüht sind, bzgl. ihrer elektrischen Ladung einen ausgeglichenen Zustand einzunehmen. Das heißt wiederum, dass jede erfolgte Ladungstrennung einen gewissen Arbeitsaufwand oder Energieaufwand erfordert hat. Nehmen wir als Beispiel Stromerzeugung mit Wasserkraft: Die Ladungstrennung im Stromgenerator erfolgt durch relative Bewegung von Spule und Magnetfeld. Es muss also Arbeit aufgewendet werden, damit das Spannungspotential aufgebaut wird. Aus energetischer Sicht: Die Lage-Energie des Wassers wird über Bewegungsenergie (Fallrohr und Turbine) und magnetische Energie (Induktion) im Generator in elektrische Energie umgewandelt. Nach dem Energieerhaltungssatz kann Energie nicht verloren gehen, sondern nur andere Formen annehmen. Sie wird als elektrische Feldenergie quasi zwischen den Polen der getrennten Ladungen gespeichert und beim Abbau der Ladungstrennung, bei dem dann Strom fließt, wieder frei. Die frei werdende Energie wird in unserem Fall von einem elektrischen Verbraucher, z.B. einer LED „verbraucht“, besser gesagt wieder in andere Formen von Energie, nämlich Wärme-/Bewegungsenergie, elektromagnetische Energie (Licht) und magnetische Energie (im elektrischen Leiter/Kabel) umgewandelt.

Die elektrische Spannung kann dementsprechend mit der Arbeit, die für die Ladungstrennung aufgewendet werden muss, gleichgesetzt werden. Deshalb wird Spannung auch als Arbeit pro Ladungseinheit definiert. Umgekehrt kann man sagen, dass die Spannung eine Größe für das Bestreben ist, Ladungen wieder auszugleichen. Aus anderer Sicht ist die Spannung die potentielle Energie des elektrischen Feldes: In einem elektrischen Feld mit den zwei Ortspunkten (A) und (B) ist die gemessene Spannung zwischen (A) und (B) gleich der Differenz der Potentialenergie vom Ort (A) und Ort (B).

In einem Stromkreis ist eine Spannungsquelle (von ihr wird die (Quellen-) Spannung aufgebaut) über einen Leiter mit einem elektrischen Verbraucher verbunden, der beim Verbrauch, wenn der Stromkreis geschlossen wird, die Spannung wieder abbaut

7. Betreiben und Ansteuern der LED

(= Spannungsabfall).

Die messbaren Auswirkungen des Energieerhaltungssatzes hat schon Gustav Robert Kirchhoff 1845 mit seiner „Maschenregel“ formuliert:

In jedem geschlossenem Stromkreis ist im Betrag die Summe der Quellenspannungen (+) gleich der Summe aller Spannungsabfälle (-). Die Summe aller Spannungen ist Null.

$$U_Q = U_{Fn} \rightarrow U_{ges} = U_1 + U_2 + \dots U_n$$

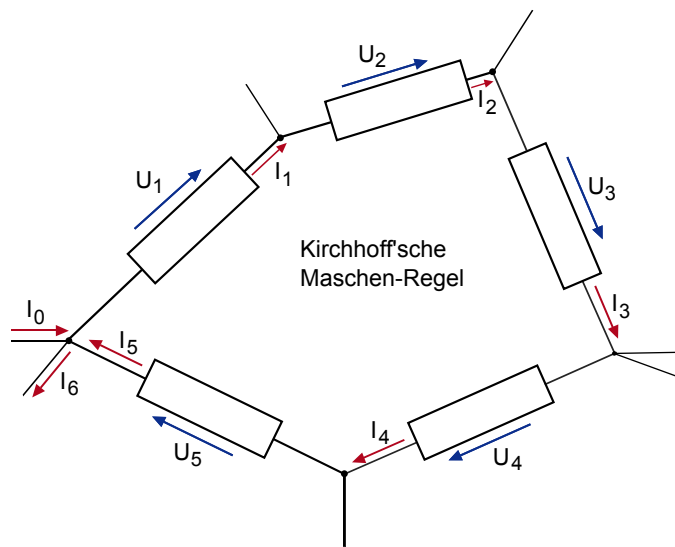


Abbildung 7.1.: Maschenregel

Die physikalischen Einheit der elektrischen Spannung ist Volt (V). In der Praxis wird ihr Betrag mit einem Spannungsmesser (z.B. Multimeter: Stellung „=V“ bei Gleichstrom, oder „~V“ bei Wechselstrom) gemessen. Die Quellenspannung wird direkt an den beiden Anschlusspolen gemessen, der Spannungsabfall wird vor und nach dem Verbraucher gemessen. Mit der Maschenregel kann man z.B. die anliegende Gesamtspannung (= Quellenspannung) über die Addition der Teilspannungen (= Spannungsabfall) ermitteln, oder umgekehrt fehlende Teilspannungen errechnen.

7.1.2. Stromstärke (I)

Elektrischer Strom ist die gerichtete Bewegung von Ladungsträgern (bzw. Elementarladungen). Spannung ist dabei die ursächliche Voraussetzung, dass Strom überhaupt fließt. Mit Stromstärke bezeichnet man die quantitative Intensität, mit der der Ladungstransport im zeitlichen Verlauf passiert. Je mehr Ladungen in einer bestimmten Zeit transportiert werden, desto höher die Stromstärke.

Der Ladungstransport (Strom) stellt bildlich gesehen den Energietransport dar. Kirchhoffs „Knotenregel“ hierzu berücksichtigt wiederum den Gedanken des Energieerhaltungssatzes, der bedeutet, dass elektrische Ladungen erhalten bleiben:

In einem Knotenpunkt eines elektrischen Netzwerkes ist die Summe der zufließenden Ströme im Betrag gleich der Summe der abfließenden Ströme.

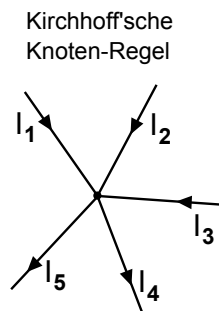


Abbildung 7.2.: Knotenregel nach Kirchhoff

Die Stromstärke hat die physikalische Einheit Ampere (A). Man kann sie in der Praxis ebenfalls mit einem Multimeter-Meßgerät ermitteln, in dem man das Messgerät in den Stromkreis schaltet, d.h. das Messgerät an dieser Stelle den Leiter ersetzt. I.d.R. gibt es am Multimeter zwei verschiedene Einstellungen zum Messen in Ampere oder bei schwachen Strömen zum Messen in Tausendstel Ampere (mA).

Die Kirchhoff'sche Maschenregel eignet sich, um fehlende Teil-Stromstärken zu messen. Um jetzt den Zusammenhang bzw. das Verhältnis zwischen Spannung und Stromstärke zu beschreiben benötigt man noch eine dritte Größe, die sich hier auswirkt:

7. Betreiben und Ansteuern der LED

7.1.3. Der elektrische Widerstand (R)

7.1.3.1. Widerstand unter Gleichstrom-Bedingungen

Der Stromfluss wird in seiner Größe von den physikalischen Gegebenheiten (des Leiters) begrenzt. Wir erinnern uns z.B. an das Gitter-Modell bei Metallen, wo die freien Elektronen durch die Atomrümpfe in ihrer Beweglichkeit limitiert sind. Je nach Art des Metalls/Leiters und der Temperatur im Leiter wird dem Strom also ein spezifischer Widerstand entgegengesetzt. Im Kapitel "Elektrische Leitfähigkeit" wurde bereits auf dieses Phänomen eingegangen. Bei einem elektrischen Leiter, z.B. einem Kabel ist der tatsächliche Widerstand von der Kabelgeometrie (Querschnittfläche (A), Länge (L)) und dem spezifischen Widerstand ρ (rho) des Leiters abhängig:

$$R = \rho \cdot L : A$$

Weil die Querschnittfläche des Leiters im Nenner auftaucht ist sie indirekt proportional zum Widerstand, d.h. der Widerstand eines runden Kabels steigt mit kleinerem Durchmesser. Dieser Zusammenhang ist in der Praxis immer zu beachten. Man kann sich als Gedankenbrücke ein Wasserrohr vorstellen, bei dem weniger Wasser transportiert werden kann, wenn der Rohr-Durchmesser kleiner wird.

7.1.3.2. Ohm'scher Widerstand

Von einem Ohm'schen Widerstand spricht man dann, wenn der Wert des Widerstandes (nahezu) konstant ist, also unabhängig von Spannung, Stromstärke und Frequenz des Stroms. Die Regel dazu heißt Ohm'sches Gesetz:

$$R = U : I$$

umgestellt:

$$I = U : R$$

bzw.:

$$U = R \cdot I$$

Betrachten wir die umgestellten Versionen der ersten Gleichung und setzen für R den konstanten Wert 1 ein, so heißt das, dass bei einem Ohm'schen Widerstand die Stromstärke I linear mit der Spannung U zu- oder abnimmt. Die physikalische Einheit für den elektrischen Widerstand heißt Ohm (Ω)

Beispiel. Ein Kupferdraht mit bestimmtem Querschnitt und bestimmter Länge wird von einem Gleichstrom durchflossen. Der resultierende Widerstand wird durch den spezifischen Widerstand des Kupfermaterials, seiner Länge und seinem Querschnitt bestimmt. Wegen dieses Widerstandes fällt an ihm eine bestimmte Spannung ab, die in Wärme umgewandelt wird und den Kupferdraht entsprechend erhitzt. Durch die steigende Erwärmung kann sich bei fehlender Kühlung der Widerstand weiterhin erhöhen.

In der Praxis misst man den Widerstand mit einem Multimeter. Der zu messende Widerstand darf dabei nicht an eine Spannungsquelle angeschlossen werden.

7.1.4. Der Skin-Effekt

Jeder mit Strom durchflossene Leiter baut ein elektromagnetisches, ringförmiges Magnet-Feld um den Leiter auf. Man kann diesen Effekt z.B. mit einer Kompassnadel nahe am Leiter sichtbar machen, die dann auch die Richtung des Stromflusses anzeigt.

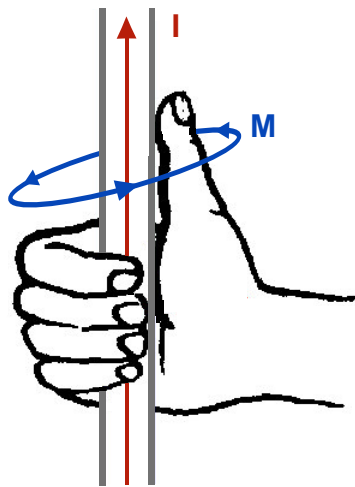


Abbildung 7.3.: Rechte-Hand-Regel: Magnetfeld- (Finger-) u. Strom-Richtung (Daumen-)

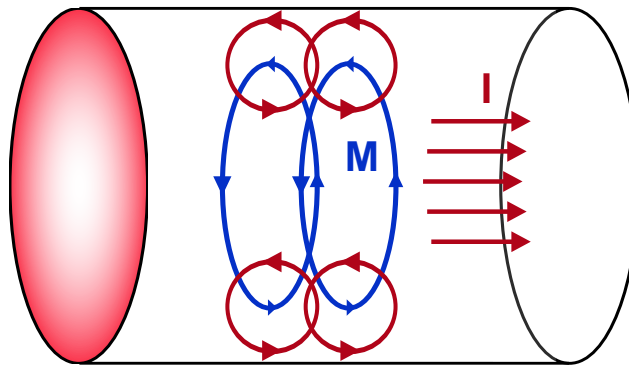
Die Rechte-Hand-Regel ist eine Merk-Hilfe für die Bestimmung der Stromrichtung

7. Betreiben und Ansteuern der LED

bei einem Strom durchflossenen Leiter.

Bei Betrieb mit Gleichstrom wirkt sich dieses gleichmäßige Magnetfeld nicht auf die Leitfähigkeit des Leiters aus, d.h. die Stromdichte im elektrischen Leiter bleibt überall gleich. Bei Wechselstrom jedoch entstehen durch die ständige Umpolung von Plus nach Minus und die daraus resultierende Änderung von Richtung und Stärke des sich auf und abbauenden Magnetfeldes mittels Induktion sogenannte Wirbelströme im Leiter-Inneren selbst. Diese sind dem durch den Leiter fließenden Wechselstrom in großen Teilen entgegen gerichtet. Die Gegenspannung ist im Inneren des Leiters am höchsten, dort sperrt sie den Strom, an der Außenwänden beträgt sie gleich Null. Der Strom aus der angelegten Spannung an den Leiter wird daher Richtung Leiterwand gedrängt, wo die geringsten Widerstände herrschen.

Ursache des Skin-Effekts:



Wirbelströme erzeugen ein Magnetfeld im Leiter

Abbildung 7.4.: Entstehung des Skin-Effekts

Im Ergebnis wird die tatsächlich leitende Schicht im Außenbereichs des Kabels, immer dünner und besteht nur aus einem Mantel bzw. einer Hautschicht unterhalb der Kabeloberfläche. Innerhalb der Skin werden ca. zwei Drittel des gesamten Stroms im Leiter transportiert. Der Leitungswiderstand erhöht sich entsprechend. Der Skin-Effekt (skin = engl.: Haut) steigt mit der Frequenz des Wechselstroms exponentiell an, entsprechend nimmt die leitende Schicht in ihrer Dicke ab.

Abbildung unten: Frequenzabhängige Skin-Tiefe δ einer Kupferleitung bei Wechselstrom:

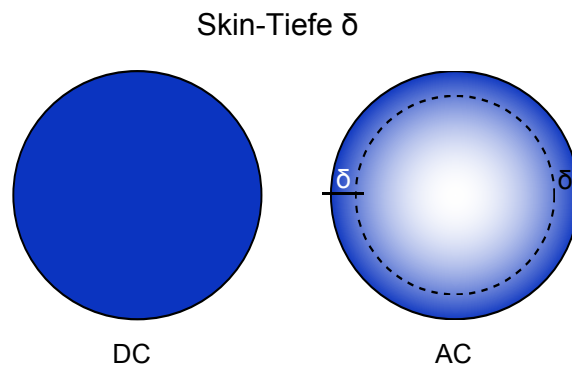


Abbildung 7.5.: Schema Skin-Effekt

Frequenz	Skin-Tiefe (δ)
50 MHz	9,38 mm
60 MHz	8,57 mm
1 KHz	2,10 mm
5 KHz	0,94 mm
10 KHz	0,66 mm
50 KHz	0,30 mm
100 KHz	0,21 mm
500 KHz	0,094 mm
1 MHz	0,066 mm
10 MHz	0,021 mm
100 MHz	0,006 mm
1 GHZ	2,1 μm
10 GHz	0,7 μm
100 GHz	0,2 μm

Tabelle oben gilt für Kupferleiter

Was kann man unternehmen, um den Skin-Effekt zu minimieren?

Man könnte bei gleicher Frequenz die Oberfläche des Leiters erhöhen. Bei Hochfrequenz-Leitungen arbeitet man deshalb mit Hohl- bzw. Mantel-Leitungen, die selbst oft aus verflochtenen/verdrillten Kupfergeweben bestehen (HF-Litze, Antennenkabel,

7. Betreiben und Ansteuern der LED

Netzwerkkabel..).

7.1.5. Die elektrische Leistung (W)

In der Physik wird unter Leistung die pro Zeiteinheit umgesetzte Energie verstanden. Die physikalische Einheit ist Watt. Im Fall von elektrischer Energie muss zwischen Gleichstrom, der seine Richtung behält, und Wechselstrom, der seine Richtung periodisch ändert, unterschieden werden. Betrachten wir zunächst den einfacheren Fall bei Gleichstrom:

Hier ist die elektrische Leistung (P) die umgesetzte Energie, d.h. das Produkt aus elektrischer Spannung (U) und elektrischer Stromstärke (I):

$$P = U \cdot I$$

Bei Wechselspannung, wo die Spannung periodisch zwischen Null und dem oberen Spannungsscheitelwert pendelt, kann die Leistung entweder nur für einen bestimmten Augenblick ermittelt werden (Momentanleistung), oder man muss zwischen 3 Leistungsarten unterscheiden:

- Wirkleistung P (W), die Leistung die tatsächlich umgesetzt wird
- Blindleistung Q (var), die durch Phasenverschiebung oder Oberschwingungen erzeugte, nicht nutzbare Energie pro Zeitintervall
- Scheinleistung S (VA), die Anschlussleistung, d.h. die Summe aus Wirk- und Blindleistung

Mehr zu dieser Leistungsproblematik bei Wechselstrom sei später beim Thema LED-Vorschaltgeräte gesagt.

7.1.6. Serien- bzw. Reihenschaltung

Betrachten wir zunächst eine Schaltung ohne Abzweigungen, bzw. den unverzweigten Teil einer komplexeren Schaltung: Werden zwei oder mehrere Bestandteile einer unverzweigten Schaltung hintereinander geschaltet, so spricht man von einer Serien- oder Reihenschaltung. In einer Reihenschaltung sind mehrere Verbraucher abhängig voneinander, sie können nur gemeinsam geschaltet werden. Fällt ein Verbraucher aus, erhalten die anderen keinen Strom mehr.

Der Gesamtwiderstand R_{ges} der Schaltung entspricht (ohne dem Leitungswiderstand) den addierten Widerständen der einzelnen Bauteile:

$$R_{ges} = R_1 + R_2 + \dots R_n$$

7.1. Einschub: Elektrotechnische Grundlagen

Unter Ohm'schen Bedingungen gilt hier auch: Bei allen Verbrauchern bzw. Widerständen ist die Stromstärke I im Wert gleich groß, d.h. in Phase, Amplitude und Frequenz identisch:

$$I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n$$

Nach der Kirchhoff'schen Maschenregel gefolgert bedeutet das für die Spannung: In einer Reihenschaltung mit Ohm'schen Verbrauchern ist die Summe der Teilspannungen, die bei den einzelnen Verbrauchern/Widerständen abfällt, gleich der Gesamtspannung:

$$U_{ges} = U_1 + U_2 + \dots U_n$$

Aus dem Ohm'schen Gesetz ($U = R \cdot I$) ist deshalb entsprechend zu folgern:

Bei einer Reihenschaltung verhalten sich die Teilspannungen wie die zugehörigen Widerstände, da die Stromstärke konstant bleibt (setzen Sie z.B. den Wert 1 für das konstante I ein..):

$$U_n = R_n \cdot I_{const}$$

Die Gesamtleistung ist in einer Reihenschaltung die Summe der Leistungen jedes Verbrauchers.

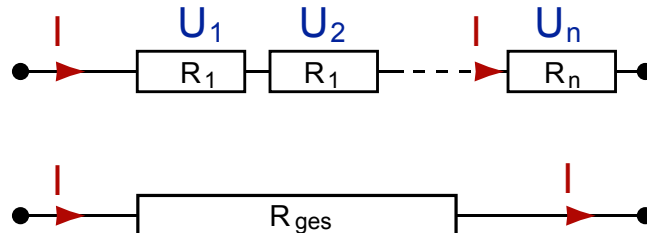


Abbildung 7.6.: Schema einer einfachen Reihenschaltung

In der Praxis kommen Reihenschaltungen immer vor. Die Zuleitung, der Verbraucher und die Rückleitung stellen z.B. eine Reihenschaltung aus drei Widerständen dar. Wenn die Zuleitung nicht vernachlässigbar kurz und groß im Querschnitt ist, kommt beim Verbraucher nicht die Quellenspannung an, sondern eine um den Leitungswiderstand verminderte Spannung, die bei großen Längen und/oder kleinen Querschnitten entsprechend viel kleiner ausfällt.

7. Betreiben und Ansteuern der LED

7.1.7. Parallelschaltung

Bei der Parallelschaltung sind die gleichartigen Pole von zwei oder mehreren Verbrauchern miteinander verbunden. Jeder Verbraucher erhält unabhängig von den anderen die gleiche Spannung und kann separat geschaltet werden. Ein Ausfall eines Verbrauchers bewirkt nicht den Ausfall eines anderen.

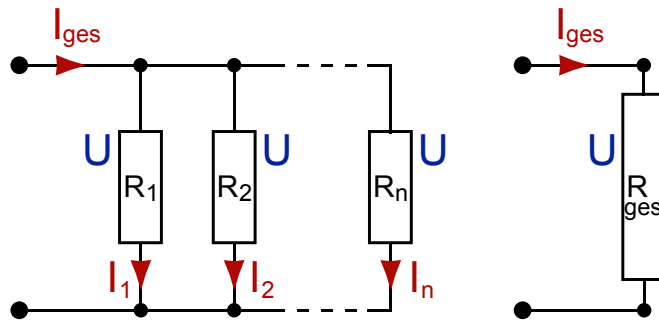


Abbildung 7.7.: Schema einer einfachen Parallelschaltung

Die Spannung ist bei der Parallelschaltung für alle Teilzweige im Wert gleich groß, d.h. in Phase, Amplitude und Frequenz identisch:

$$U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n = U_{const}$$

Weil bei der Parallelschaltung an allen Widerständen die gleiche Spannung anliegt, verteilt sich der Gesamtstrom nach der Kirchhoff'schen Knotenregel auf die einzelnen Abzweige, d.h. die Gesamtstromstärke ist gleich der Summe der Teilstromstärken:

$$I_{ges} = I_1 + I_2 + \dots I_n$$

Nach dem Ohm'schen Gesetz, in der Form von $U = I \cdot R$ ausgedrückt, folgern wir für die Parallelschaltung:

$$U_{const} = I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2 = I_3 \cdot R_3 = \dots I_n \cdot R_n$$

Nach $I = U : R$ verhalten sich bei konstanter Spannung die Teilstromstärken umgekehrt wie die zugehörigen Widerstände:

$$I_n = 1 : R_n \text{ bzw. } I_1 : I_2 = R_2 : R_1$$

Der Gesamtwiderstand einer Parallelschaltung bestimmt sich durch:

$$1 : R_{ges} = 1 : R_1 + 1 : R_2 + 1 : R_3 + \dots 1 : R_n$$

7.2. Die LED bei Batteriebetrieb

Die Gesamtleistung ist auch in einer Parallelschaltung die Summe der Leistungen jedes Verbrauchers.

Unser Haushaltsstromnetz liefert das beste Beispiel für eine Parallelschaltung. Jedes Gerät, das an einer Steckdose in den Stromkreis eingekoppelt wird erhält die gleiche Spannung bzw. ist unabhängig von ihrer tatsächlichen Leistungsaufnahme auf diese Spannung ausgelegt.

7.2. Die LED bei Batteriebetrieb

Den Einsatz der LED im Batterie-/Akkubetrieb kennen wir von der modernen Fahrradbeleuchtung oder der Taschenlampe. Hier bietet sich die LED gerade an, weil sie weniger Strom als eine Glühlampe verbraucht und somit länger leuchtet.

7.2.1. Einschub: Versuch mit einfacher LED-Schaltung

Aufgabe: Um eine LED mit Batterie zum Leuchten zu bringen machen wir folgenden Versuch:

Wir haben in einem Bastel-Kit nur bestimmte Materialien zur Verfügung, um damit eine möglichst helle, LED-Signallampe zu bauen:

- eine 12V Batterie (Typ 8LR932)
- 5 weiße 2-Pin-LEDs (Datenblattangaben: $V_F = 3,4V$, $I_F = 30mA$)
- 5 Stück 68 Ohm Widerstände mit $+/- 2\%$ Toleranz
- 4. Kabel, einen kleinen Schalter und eine Lötstation

Frage: Können wir daraus eine funktionierende LED-Lampe bauen, bzw. welche Teile müssen wir dazu hernehmen und wie müssen wir diese miteinander verbinden? Gehen wir doch mal ganz unbedarft an die Lösung des Problems...

Überlegung 1: Macht es Sinn alle 5 LEDs verwenden, um möglichst viel Licht zu bekommen und geht das hier eventuell?

> Die Leistung bei Gleichstrom bestimmt sich durch $P = U \cdot I$ > Wir setzen die gegebenen Werte für eine LED ein: $3,4 V \cdot 0,03 A = 0,102 W$ Leistung pro LED. Da die Gesamtleistungsaufnahme die Summe der einzelnen Verbraucherleistungen ist, wären wir mit 5 LEDs bei 0,51W. Es ist also erstrebenswert, für viel (Licht-) Leistung auch möglichst viele LEDs zu verwenden. Fraglich ist, ob das funktioniert...

Überlegung 2: Können wir 5 LEDs dazu in Serie schalten?

7. Betreiben und Ansteuern der LED

>> bei Reihenschaltung gilt $U_{ges} = U_1 + U_2 + \dots + U_5$ Bei fünf LEDs kämen wir entsprechend auf $3,4 \cdot 5 \text{ V} = 17 \text{ V}$ Wir haben aber nur 12V Batteriespannung.

Antwort: >>> Nein, leider funktioniert's hier nicht, die Spannung reicht nicht aus.

Reine Neugier: Würden die 5 LEDs wenigstens schwach leuchten? $12 : 5 = 2,4 \text{ V}$ > Nein, das reicht nicht für die Überwindung der Schleusenspannung einer weißen LED, alle fünf blieben dunkel.

Überlegung 3: können wir alternativ mit einer Parallelschaltung alle 5 LEDs direkt betreiben?

>> Bei parallel geschalteten Verbrauchern ist die Spannung in jedem Zweig gleich groß der Gesamtspannung im Stromkreis.

$U_{ges} = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n \quad \wedge \quad U_{Batt.} = 12\text{V} > \text{d.h. bei jeder LED würden die 12V anliegen.}$

Antwort: >>> Nein, zu viel Spannung läge an jeder LED!

Überlegung 4: Und wenn man in der Parallelschaltung einen Widerstand direkt vor jede der 5 LEDs schaltet?

>> die Größe des mindestens erforderlichen Vorwiderstandes R_V im Abzweig (in dem die Gesetze der Reihenschaltung gelten!) muss so bestimmt werden, dass man hinter diesem auf die geforderten Werte kommt.. Wir tun so, als würde das Ohm'sche Gesetz gelten und rechnen:

$$R_V = (U_B - U_F) : I_F >> (12\text{V} - 3,4\text{V}) : 0,03\text{A} = 286,7 \text{ Ohm}$$

Antwort: >>> Nein, das geht also nicht, denn wir haben ja nur 68 Ohm Widerstände zur Verfügung, d.h. der Strom am Bauteil wäre bei Benutzung dieser Vorwiderstände vor jeder LED mehr als fünf mal zu hoch: $12 \text{ V} : 68 \text{ Ohm} = 0,176 \text{ A}$ bzw. 176 mA

Überlegung 5: Wir müssen Abstriche an die Helligkeit machen. Wie viele LEDs können dann maximal mit der 12V-Batterie in Serienschaltung betrieben werden?

>> $12\text{V} : 3,4\text{V} \sim 3,5$ Bei 3 in Serie geschalteten LEDs müsste die Spannung wieder mit einem Vorwiderstand begrenzt werden (eine übliche Vorgehensweise, um eine

7.2. Die LED bei Batteriebetrieb

sichere Spannungsbegrenzung zu setzen). Die Berechnung der Mindestauslegung erfolgt analog:

$$R_V = (U_B - U_F) : I_F > (12V - 10,2V) : 0,03A = 60 \text{ Ohm}$$

Wir überprüfen unser rechnerisches Ergebnis auf Richtigkeit, in dem wir die anderen Widerstände betrachten: in einer Reihenschaltung addieren sich die Einzelwiderstände zum Gesamtwiderstand

$$R_B = R_V + R_1 + R_2 + R_3 > 12V : 0.03A = 400\Omega = 60\Omega + 3(3,4V : 0,03A) = 60\Omega + 340\Omega$$

RICHTIG gerechnet >> Der zur Verfügung stehende 68 Ohm Widerstand mindert zwar die Stromstärke auf 29,4 mA ($12V : 408\Omega$), d.h. die Helligkeit geringfügig bzgl. des Optimalwertes, aber das ist OK. Antwort: >>> Ja, so geht's!

L Ö S U N G der Aufgabe: mit 3 LEDs in Serie geschaltet und einem vorgeschalteten 68 Ohm Widerstand kann man die geforderte LED-Lampe mit den Mitteln des Bastelkits bauen!

Was ich mit dieser Aufgabe aufzeigen will:

1. Bei der Ansteuerung von LEDs müssen LED-Charakteristik und Spannungsquelle schon bei einfachsten Aufgabenstellungen in das elektronische Design einbezogen werden.
2. Die grobe Auslegung der Ansteuerung kann rechnerisch eingegrenzt werden, auch wenn dabei eigentlich ungültige Annahmen gemacht werden (Ohmscher Widerstand etc.)

7.2.2. Vor- und Nachteile beim Batteriebetrieb

Die Leistungsfähigkeit von Batterien, insbesondere von Akkus (wiederaufladbare Batterien) ist die letzten Jahre weit angestiegen. Es gibt deshalb mittlerweile leuchtkräftige LED-Lampen in tragbarer Ausführung, die starke Power-Chip-LEDs oder eine COB-LED mit einem Lithium-Ionen Akku kombinieren.

Batterien und Akkus haben die Eigenschaft, dass ihre Spannung nicht wirklich ganz konstant ist, auch wenn die Angaben darauf hindeuten. Besonders am Ende des Zyklus nimmt die Spannung je nach Batterietyp bis zur Entladeschluss-Spannung ab, die ca. ein Viertel niedriger liegt. Man kennt den Effekt von jeder Taschenlampe. Deshalb wird in der Praxis die Spannung, oder hier seltener die Stromstärke, auf ein

7. Betreiben und Ansteuern der LED



Abbildung 7.8.: tragbarer 12VDC/20W-Strahler mit leistungstarker 1800 lm COB-LED

konstantes Niveau mit elektronischen Schaltungen/Bauteilen geregelt. Spannungsbegrenzung ist eine immer zu empfehlende Sicherheitsmaßnahme für den Betrieb von LEDs, sowohl um Schaden abzuhalten, als auch um die Leuchtkraft konstant zu halten. Sie kann bereits wie im Versuch gezeigt mit einem einfachen Widerstand erfolgen. Für eine Batterie bräuchten wir dazu so etwas wie einen variablen Widerstand, der sich der angelegten Spannung je nach Zustand von Batterie oder Akku selbst dynamisch anpasst. So etwas gibt es natürlich. Im einfachsten Fall reicht ein Transistor, an dem die „überflüssige“ Spannung dann entsprechend abfällt.

Der Nachteil bei dieser Methode ist, dass das Bauteil selbst dann entsprechend Strom verbraucht und heiß wird. Mit wesentlich mehr technischem Aufwand, unter dem Einsatz von Kondensatoren, Drosseln, Spulen, Schottky-Dioden, Mikrocontroller, etc. kann eine exakte Einstellung durch sogenannte Schaltregler erreicht werden, die auch in Trafos oder Konvertern für Netzstrom Verwendung finden. Sie arbeiten Energie-effizienter, da die Spannungsdifferenz nicht in Wärme umgewandelt wird, sondern als magnetische Energie zwischengespeichert wird.

Umgekehrt kann man auch die Stromstärke unabhängig von der Eingangsspannung konstant halten, was für LEDs eigentlich zu bevorzugen ist. Mit Hilfe von Stromregeldioden (FET = Feld-Effekt-Transistoren), Operationsverstärkern, Integrierten Schaltkreisen, PTAT- oder UBE-Reglern, wird seltener Batteriestrom, sondern vor allem gleichgerichteter Netzstrom für die LED passend geregelt. Mehr dazu später.

7.3. Betrieb mit Wechselstrom

Die Verwendung von Wechselstrom zum Betrieb der LED erscheint schon deshalb interessant, weil der Strom, der überall im Haushaltsnetz zur Verfügung steht, stets Wechselstrom ist. Wie bis hierher aber deutlich geworden sein sollte, ist die LED jedoch eindeutig auf Gleichstrom ausgelegt. Betrachten wir zunächst die Unterscheidungsmerkmale von Wechselstrom zu Gleichstrom.

7.3.1. Einschub: Charakteristik von Wechselstrom

Wechselstrom (AC für alternating current) heißt der Strom, der seine Richtung (bzw. Polung, z.B. von Plus nach Minus) nicht beibehält, sondern wechselt. Diese Umdrehung der Stromrichtung erfolgt im zeitlichen Verlauf sehr gleichmäßig, man nennt den Wechsel aufgrund seiner Gleichmäßigkeit eine Schwingung und die Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit nennt man Frequenz (Hz). Die Schwingung, auch als Periode bezeichnet, besteht aus einer Halbschwingung im positiven Bereich und einer Halbschwingung im negativen Strombereich. Graphisch auf eine Zeitachse bezogen ergibt dies einen Zeit-Verlauf, dessen Moment-Werte die Funktion einer Sinus-Funktion erfüllen.

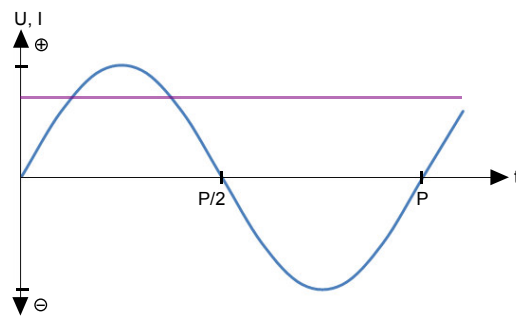


Abbildung 7.9.: Wechselstrom-Diagramm: Periodische Änderung der Stromrichtung von Plus nach Minus

Schauen wir auf die Sinuskurve oben in der Graphik, die einen idealisierten bzw. Ohm'schen Stromverlauf darstellt. (Ein Oszilloskop an der Steckdose würde i.d.R. einen nicht so eindeutigen bzw. sauberen Verlauf, z.B. wegen Oberschwingungen, zeigen.) Im Beginn des Graphen, zum Zeitpunkt „0“, fließt kein Strom. Er kommt dann vom Pluspol und steigt kontinuierlich in seiner Stärke an. In der Mitte der positiven Halbschwingung ist der maximale Wert (Scheitelwert S) erreicht, die

7. Betreiben und Ansteuern der LED

Spannung ist am höchsten und fällt anschließend wieder bis auf Null herunter. Dann wechselt die Stromrichtung, die gleiche Entwicklung passiert, diesmal aus der anderen Richtung vom Minuspol her kommend. Die Periode (entspricht der Wellenlänge des Graphen) geht von Nulldurchgang bis Nulldurchgang. Der Unterschied zum violett eingezeichneten Gleichstrom ist deutlich. Der Gleichstrom behält seine Stromrichtung und ist deshalb hier mit einer beliebigen, konstanten Spannung im positiven Wertebereich des Koordinatensystems eingezeichnet. Bei uns in Europa wechselt der Strom aus dem Haushaltsnetz seine Richtung mit einer Frequenz von 50 Hertz, das heißt er wechselt 50 mal pro Sekunde die Richtung. In anderen Ländern kann die Frequenz z.B. bei 60 Hz liegen (USA,...). Unsere Deutsche Bahn z.B. arbeitet mit 16,7 Hz für den Zugbetrieb.

Wie setzt man eigentlich die Höhe der (Netz-)AC-Spannung fest, wo sie doch ständig variiert?

Die Angabe von 230V beim Haushaltsnetz z.B. bezieht sich auf einen Mittelwert, den man rechnerisch aus möglichst vielen Werten einer Halbwelle ermitteln kann, da der Verlauf symmetrisch ist. Er liegt bei ca. 70,7 Prozent des Maximalwerts, natürlich bezogen auf exakte Ausgangswerte und „unverschmutzte“ Netze. (Im Bild könnte man den Gleichstromgraph zugleich von der Höhe her als (Spannungs-) Äquivalent zum Mittelwert der Wechsellspannung interpretieren) In Wirklichkeit existieren in unseren Stromnetzen temporär schwankende Netzspannungen, je nachdem wie viel Strom gerade insgesamt verbraucht wird. Die Stromversorger versuchen mit relativ hohem Aufwand, die Spannung konstant auf 230V zu halten.

Warum sieht man den Wechsel bzw. die Nulldurchgänge nicht bei der Glühbirne? Dies liegt nicht nur an der Trägheit unserer visuellen Wahrnehmung. Der Wolframdraht ist glühend heiß und kühlt für die kurze Zeitspanne in Richtung des Nulldurchgangs und in diesem selbst, kaum merklich ab. Man sagt, das Verhalten des Glühdrahts ist träge. Unser Auge ist nicht in der Lage, die dennoch feinen Helligkeitsunterschiede, die auftreten wahrzunehmen. Woher kommt dieser ständige Wechsel? Das kommt vom Prinzip der Stromerzeugung. Im Strom-Generator (z.B. Fahrraddynamo) drehen sich Spule und Magneten kreisförmig zueinander hin und wieder weg. Je nach Abstand entstehen unterschiedlich starke Felder, wodurch der induzierte Strom seinen gleichmäßigen Sinuscharakter bekommt. In Idealposition des drehenden Magnet-(Spulen-)Ankers wird jeweils maximaler Strom in Plus- oder Minus-Richtung induziert, dazwischen steigt er, fällt, oder ist im Wechsellpunkt Null.

7.3.2. LED-Betrieb an Netzspannung

In der Werbung oder Produktbeschreibung von LED-Leuchten wird öfters darauf hingewiesen, dass das entsprechende Produkt direkt an die Netzspannung angeschlossen werden kann. Nur in den wenigsten Fällen bedeutet das aber, dass bei der Stromversorgung der LED wirklich auf einen Konverter oder Trafo verzichtet wird. Häufig ist er irgendwo versteckt in der Leuchte untergebracht. In aller Regel befindet sich vor der LED wenigstens ein Gleichrichter, der aus Wechselstrom einen Gleichstrom macht.

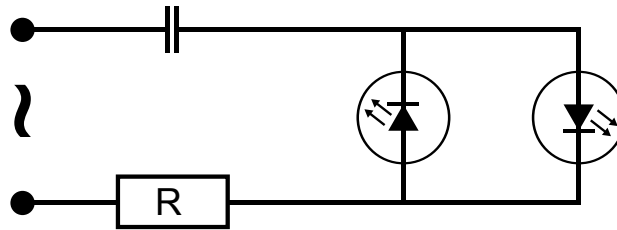
Der Anteil der LED-Lampen/-Leuchten, die direkt mit Netzstrom, also Wechselstrom bei 230V betrieben werden ist derzeit verschwindend gering. Ich werde häufig von Elektrikern danach gefragt, die davon gehört haben, dass es solche LED-Module gibt. Sie wissen aus ihrer täglichen Erfahrung, dass elektrische Vorschaltgeräte durchaus auch defekt werden können und die LED selbst meist nicht ausfällt. Große Hersteller wie Samsung und Seoul Semiconductor haben echte AC-LED-Engines am Markt, andere wie Epistar greifen auf das Know-how kleinerer Anbietern wie z.B. die US-amerikanische Link Labs in Kooperationen zurück. Die Argumente, die von den entsprechenden Herstellern für AC-LED-Technologie hochgehalten werden, klingen nicht schlecht:

- komplizierte, anfällige und teure Vorschaltgeräte werden nicht benötigt
- AC-LEDs sind einfach primär-seitig dimmbar
- gehen effizienter mit dem Strom um
- und verschmutzen das Netz weniger als übliche Netzgeräte mit Oberschwingungen

Jetzt muss man sich fragen, warum es bei so überzeugenden Vorteilen dennoch relativ wenig AC-LEDs am Markt gibt. Ein Grund könnte vielleicht der sein, dass AC-LED-Technologie mit sehr vielen Patenten, teilweise auf trivialste Konfigurationen, belegt ist. Die Patenthalter, besonders die Amerikaner haben sich als sehr klage-freudig erwiesen. Warum gibt es hier so viele Patente? Ich denke, dass das AC-Design besonders zu Beginn sehr vielversprechend aussah, nach einem großen geschäftlichen Erfolg roch, den man sich sichern wollte. Tatsächlich ist dieser Durchbruch aber zumindest bis jetzt ausgeblieben, auch wenn die bekannten Figuren in diesem Spiel nicht müde werden, so zu tun, als stünde der Markterfolg unmittelbar bevor. All das hat vielfältige Gründe.

Doch zunächst überlegen wir uns, wie der Widerspruch „Wechselstrom-LEDs“ überhaupt aussehen kann, wo doch LEDs Dioden sind, die den Strom in eine Richtung durchlassen und in die andere Richtung sperren.. leuchten die LEDs dann nur

7. Betreiben und Ansteuern der LED



AC-Design: Gegenläufige Anordnung der LEDs

Abbildung 7.10.: Schema AC-LED-Design

die Hälfte der Zeit während einer Halbschwingung? Die Physik kann man tatsächlich auch hier nicht überlisten. Man umgeht das Dilemma aber prinzipiell, wenn man für den zweiten Teil der Periode, die negative Halbschwingung, eine zweite LED umgedreht gepolt, anti-parallel dazu schaltet: Durch diese Anti-parallel-Schaltung ist also entweder LED+ oder LED- an. Doch was macht man mit der hohen Spannung von 230V? Gruppiert man jetzt abwechselnd mehrere Invers-Paare mit Vorwiderstand in Serie, z.B. 2 mal 60 LEDs, teilt sich die Spannung entsprechend durch 60 und ergibt brauchbare 3,8V-X(R). Bei diesem Beispiel wären also zu jeder Zeit im Betrieb immer 60 LEDs für eine Hundertstel Sekunde an und 60 LEDs solange aus.

Hier wird gleich ein erster Nachteil der AC-LED-Technik offensichtlich: wir brauchen prinzipiell die doppelte Anzahl an LEDs, wenn wir keine Auszeiten haben wollen. Und weil LEDs einen hohen Preisanteil an der Lampe haben ist das eher ungünstig für die Durchsetzung am Markt.

LEDs haben im Gegensatz zu Glühlampen keine nennenswerte Trägheit, sie gehen innerhalb von Millisekunden an und aus (die Vorschaltелеktronik weist aber manchmal eine gewisse Trägheit durch den Einsatz von Kondensatoren und Spulen auf). Die resultierenden 100 Hertz von der AN-AUS Schaltung zweier LEDs pro Periode sind eigentlich für unser Auge nicht wahrnehmbar (siehe TV-100Hz-Technik), können unter bestimmten Umständen dennoch als feines Flackern wahrgenommen werden. Die AC-Topologie eignet sich daher besonders für COB-LEDs, wo viele LEDs mit hoher Dichte zueinander platziert werden. Unser Auge nimmt dann Leuchtdichteunterschiede und Flickern nicht so leicht wahr.

Ein weiterer Nachteil ist die Tatsache, dass AC-LED-Engines sehr empfindlich auf Netzschwankungen reagieren, wenn man keine entsprechende Vorkehrung mit vorgeschalteter Elektronik (Kondensator, etc.) trifft. Die AC-LEDs neigen auch des-

7.3. Betrieb mit Wechselstrom

halb zum Flackern (flicker), weil sie auf Oberwellen-/THD-Effekte im Haushaltsnetz reagieren. Es stimmt schon, dass ohne Konverter keine unerwünschte Oberschwingungen erzeugt werden, dennoch ist das Netz trotzdem wegen zahlreicher Netzteile schon voll davon und ohne Konverter wirkt sich das entsprechend relativ direkter auf die empfindliche LED aus. Eine Oberschwingung ist ein Vielfaches von der Grundschiwingung. Sie hat zwar einerseits eine Frequenz über dem Wahrnehmungsbereich, weil sie eben ein Vielfaches von 50Hz aufweist, andererseits verstärkt sie durch Interferenz-Erscheinungen die Grundfrequenz, was unser Auge dann durchaus bemerkt. Wer also eine hochwertige AC-LED-Engine bauen will, kommt nicht an der Notwendigkeit von Vorschaltelctronik mit Filterfunktion (Tiefpass,...) vorbei, alternativ einer alternierenden Ansteuerung mittels eines Mikrocontrollers.

Das Versprechen der Lampen-Industrie, AC-LEDs mittels eines im Haushalt üblichen (Phasenanschnitt-) Dimmers (TRIAC) problemlos und voll dimmen zu können, kann pauschal nicht richtig sein. I.d.R. kann man die LEDs damit nur in einem relativ begrenzten Bereich dimmen und selten ganz auf Null herunter. Genaueres zur Dimm-Problematik sei an späterer Stelle genannt. Die Aussage, dass AC-LEDs effizienter arbeiten, stützt sich lediglich auf die Tatsache, dass normale Vorschaltgeräte für ihre Arbeit einen kleinen Teil der elektrischen Leistung verbrauchen, der je nach verbauter Technik variiert. Dieser Anteil entfällt bei AC-LEDs aber nur dann komplett, wenn ohne Kondensatoren etc. gearbeitet wird.

Tipp: Im Zweifelsfall gibt's für AC-LED-Arrays einen einfachen Qualitäts-Test: mit der Handy-Kamera macht man eine Video-Aufnahme von der Lichtquelle. Wenn sich im Display Streifen, Blinken, Zeilenaufbau, etc. einstellt, liegt das an einer ungeeigneten Frequenz bzw. Harmonie des LED-Moduls.

Die großen Hersteller haben auf das kaum gänzlich abstellbare Flackern ihrer AC-LEDs z.B. mit integrierten Schaltungen reagiert: diese sorgen dafür, dass stets ein Teil der LED-Cluster an ist, so dass unser Auge die Schaltunterbrechungen infolge des Dauerlichts nicht mehr wahrnimmt. Die verbauten Mikrocontroller sind aber nicht unempfindlich und ich bezweifle, dass damit die eigentlich sehr hohen Lebenszeiten der LEDs selbst erreicht werden können. Andere haben die Anti-Parallelschaltung bei ihren „Direct-Line“-Modulen inzwischen aufgegeben und einen Brücken-Gleichrichter direkt auf der Platine positioniert. So kann zumindest das Preisproblem aufgrund der doppelten AC-LED-Anzahl gelöst werden, stellt aber gleichzeitig den ganzen AC-Ansatz und die Qualität der Ansteuerung in Frage. LED-Module für den direkten Betrieb an 230V Netzspannung werden, stand heute, selten in Bereichen eingesetzt, wo sehr hohe Anforderungen an die Lichtqualität bestehen. Für den Einsatz in den Bereichen Außenbeleuchtung, Hausflur-, Keller-

7. Betreiben und Ansteuern der LED

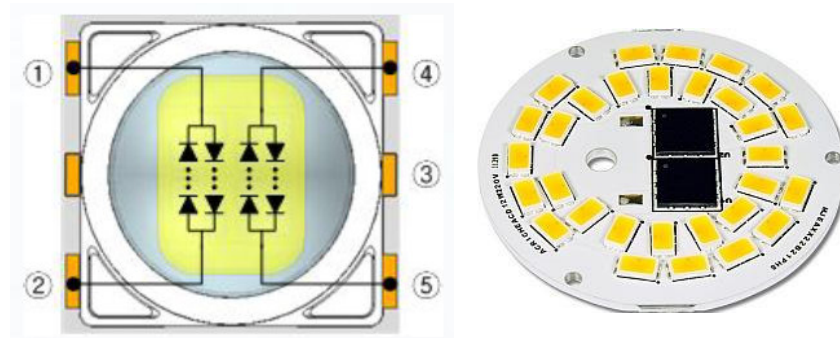


Abbildung 7.11.: Links: Schema AC-Power-LED Fa. Samsung, rechts: Acrich2 Modul Fa. Seoul-Semiconductor

oder Dachbodenbeleuchtung, können hochwertige AC-LED-Module durchaus ihre Berechtigung haben. Ich selbst habe ganz zu Beginn meiner LED-Geschichte mit dem elektrischen Design von AC-LEDs diverse Erfahrungen gemacht. Wir hatten uns damals aber für den Einsatz vorgeschalteter elektronischer Trafos entschieden, die sehr hohe Frequenzen produzieren und so das Flackern/Flickern per se minimieren. Letztlich waren aber andere Gründe ausschlaggebend, sich von der 12VAC-Technologie zu verabschieden und nur noch auf DC-Ansteuerung zu konzentrieren.

7.3.3. LED-Betrieb mit Kleinspannungs-Trafos

Ein Transformator ist ein Spannungswandler. Er wird eingesetzt, um die Spannung einer Wechselstromquelle nach unten oder oben zu transformieren. Der ideale Transformator besteht aus mindestens zwei Spulen und einem verbindenden Eisenkern dazwischen. Durch die unterschiedliche Wicklungszahl der zwei Kupferdraht-Spulen, induziert die Spannung der ersten Spule beim Stromdurchfluss eine geänderte Spannung in der zweiten Spule. Es findet eine sogenannte galvanische Trennung statt, da der Strom nicht direkt weiter fließt, sondern via Magnetfeld in eine andere Energieform (magnetische Energie) transformiert und dann durch Induktion neu als Strom aufgebaut wird. Gewickelte Eisenkerntrafos sind durch das verwendete Kupfer und Eisen ziemlich schwer und relativ groß.

Konventionelle Trafos wurden bei der Halogenbeleuchtung mit 12VAC - Kleinspannung viel verwendet, da sie sehr robust sind. Wegen der 50HZ-Frequenz

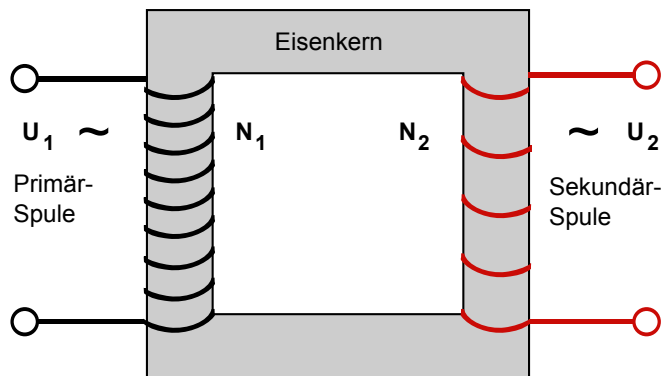


Abbildung 7.12.: Schema Ringkerntrafo

erzeugen gewickelte Trafos eine kaum merkbare Brummfrequenz, die aber durch ungünstige Resonanzbedingungen oder ungeeignete Dimmer auch deutlich lauter werden kann. Für den LED-Betrieb sind solche Trafos in dieser Form kaum geeignet, bleiben aber als verkleinertes Bauteil in elektronischen Trafos und Konvertern mit höheren Frequenzen unverzichtbar.

Die schwereren Trafonetzteile sind heute in der Beleuchtungstechnik bis auf Ausnahmen für besondere Anwendungen weitgehend von Schaltnetzteilen (Switch-Mode Power Supply / driver) abgelöst worden, die einen wesentlich besseren Wirkungsgrad haben (>90 statt $\sim 50\%$). Konstant-Spannung-Schaltnetzteile transformieren die Eingangsspannung auf einen konstant gehaltenen Wert in der Ausgangsspannung und erhöhen die Frequenz des Ausgangsstroms von ursprünglichen 50 (USA: 60) Hz auf 40-100 Tausend Hertz. Sie arbeiten meist unabhängig von einer unterschiedlich hohen oder zeitlich schwankenden Eingangsspannung. Konstantstrom-Schaltnetzteile stellen einen konstanten, definierten Strom (z.B. 750mA) zur Verfügung.

Wie funktioniert ein Schaltnetzteil?

Im Schaltnetzteil findet zunächst immer eine Gleichrichtung des Wechselstroms und anschließende Glättung statt, damit die nachfolgenden elektronischen Bauteile wie Transistoren etc. effektiv arbeiten können. Anschließend wird diese Gleichspannung mit sehr hoher Frequenz in eine sogenannte Rechteckspannung zerhackt/getaktet/geschaltet. Ein kleiner Spulen-Trafo bringt die Rechteckspannung dann auf einen festgelegten Schutzkleinspannungswert herunter, meist beträgt dieser bei elektronischen Trafos 11,8 VAC (Die 11,8 V hatten sich seinerzeit als

7. Betreiben und Ansteuern der LED

ideal für den Betrieb von Halogenlampen herausgestellt). Für sogenannte Konverter, so nennt man DC-Schaltnetzteile, wird im Gegensatz zum elektronischen Trafo anschließend der Strom noch gleichgerichtet und gesiebt. Schaltnetzteile haben auch ihre Nachteile: sie erzeugen durch den Gleichrichter und Zerhacker Blindströme, die ins Netz zurückfließen. Durch das Zerhacken in hohe Frequenzen entstehen Hochfrequenz-Störungen im Netz und Rundfunkbereich, falls keine geeigneten Gegenmaßnahmen vom Geräte-Hersteller getroffen werden. Aus diesem Grund darf auch die maximale Zuleitungslänge zur LED-Leuchte nicht mehr als 2 m betragen, da sonst EMV-Richtlinien verletzt werden, weil die Leitung als Dipol-Antenne wirkt.

Elektronische Trafos sollten nicht mit einer höheren Last betrieben werden als angegeben, da sie sonst die LEDs zum Flackern bringen können und diese bald Schaden nehmen.



Abbildung 7.13.: Elektronischer 12V-Trafo

Elektronische Trafos müssen folgende Angaben haben:

- Leistungsbereich der Anschlussleistung X-Y W/VA, z.B. 0-50 (/75/100/..) VA
- Kennzeichnung von Eingangs (prim.) und Ausgangsseite (sec.)
- Lastart-Eignung (R=Ohmsche Last, L = Induktive Last, C=kapazitive Last)
- CE-Zeichen = Konformitätsbescheinigung des Herstellers mit EU-Normen
- Herstellerangabe

Sie sollten unbedingt folgende Sicherheitsmerkmale aufweisen:

- Überspannungsschutz
- Übertemperaturschutz
- Kurzschlussfestigkeit / Galvanische Trennung

Für den sicheren Verbau/Betrieb des Trafos achten Sie auf folgende Prüf-Zeichen / Zertifikate:

7.3. Betrieb mit Wechselstrom

- SELV = Sicherheitskleinspannung, Schutzklasse 3
- MM = Montage auf Materialien mit unbekannten Entflammeigenschaften möglich (max. 95° C im Betrieb/115 ° C im Ausnahmefall)
- F = Befestigung auf brennbarem Grund möglich (max. 130° C/180° C)
- TÜV = TÜV-Siegel. Geprüft durch den Technischen Überwachungsverein
- GS = Geprüfte Sicherheit (immer mit Angabe der Prüfstelle z.B. TÜV, DEKRA, ...)
- VDE = Gerätesicherheit nach VDE-Bestimmungen, Prüfung durch VDE erfolgt
- ENEC = Konformität nach EU-Normen geprüft durch Prüfstelle, entspricht qualitativ z.B. einer VDE- oder anderen nationalen Zertifizierung
- UL = Konformität nach US-Normen geprüft durch UL (Underwriters Laboratories) aber: steht ein „listed“ dahinter, bedeutet das nur die Anmeldung zur Prüfung...
- EMC/EMV = Überprüfung auf elektromagnetische Verträglichkeit (schon Bestandteil von VDE/UL/ENEC/..)



Abbildung 7.14.: Prüfzeichen bzw. Zertifizierungen

Was ist unter Kleinspannung zu verstehen? Kleinspannung oder Niederspannung (ELV Extra Low Volt) ist für Wechselstrom bis 50 Volt, für Gleichstrom bis 120 V definiert. Bis zu diesen Spannungen bleibt die Berührung bei gesunden Erwachsenen i.d.R. ohne lebensbedrohende Konsequenzen. Sicherheitskleinspannung (SELV) der Schutzklasse 3 geht bis 25VAC, bzw. 60VDC, erfordert eine galvanische Trennung und trifft für die meisten Trafos im Beleuchtungsbereich zu. Die Spannung ist hier relativ ungefährlich, deshalb ist nicht einmal ein Berührungsschutz nötig. Die bekannten Seilsysteme für Halogenspots arbeiten z.B. mit 12VAC. Viele MR16-

7. Betreiben und Ansteuern der LED

LED-Spots (GX 5.5) können daher als Retrofit mit Wechselstrom auf 12-Volt-Basis angesteuert werden. Sie besitzen i.d.R. einen kleinen Gleichrichter direkt im Spot verbaut.

Zu Beginn der LED-Ära war es gar nicht einfach, Trafos zu finden, die nicht nur auf den Betrieb von 12V-Halogenspots ausgerichtet waren und mit denen man genauso LEDs ansteuern konnte. Wo liegt das Problem? Das Problem heißt Mindestlast. Halogenstrahler sind wegen ihrer Ohmschen Last und ihres relativ großen Stromverbrauchs entweder mit gewickelten Trafos oder mit elektronischen Trafos zu betreiben. Diese arbeiten in einem begrenzten Bereich z.B. von 20/40/.. bis 50/70/..VA, starten erst ab einer bestimmten Mindestlast. Für Halogenlampen ist das kein Problem, da eine einzige Halogen-MR16 ja schon mindestens 25 Watt Leistung erzeugt. Für LEDs bedeutet das Unterschreiten der Mindestlast aber oft Flackern im normalen oder gediminten Betrieb. Aus technischen Gründen wird ein Transformator grundsätzlich für einen ganz bestimmten Arbeitsbereich ausgelegt (außer wenn Größe und Preis keine Rolle spielen..), das hat mit der Leistungs-Bemessung der verwendeten Bauteile zu tun. LED-Trafos müssen aber so konzipiert sein, dass ein LED-Verbraucher der nur ein oder wenige Watt zieht, bzw. mehrere LED-Verbraucher im entsprechend herunter gediminten Zustand mit geringer Last, dennoch einwandfrei funktionieren. Daher sollte man für LED-Lampen sogenannte „Zero Load“-Trafos benutzen, die bereits mit einer Leistung von kleiner gleich 1 W arbeiten können.

Welche Vor- und Nachteile hat der Einsatz von Kleinspannungstrafos bei LED-Beleuchtung?

Ein Vorteil ist der, dass man hier die Lampe/Leuchte primärseitig, also auf der Hochvoltseite dimmen kann, da elektronische Trafos auch kleinere Spannungen verarbeiten. Dies funktioniert am Besten mit einem Phasenabschnittdimmer (Kennzeichnung „C“).

Nachteilig ist die Tatsache, dass der Dimmbereich begrenzt ist, nicht jeder Trafo mit jedem Dimmer harmoniert und es auch von der verwendeten Elektronik im LED-Leuchtmittel abhängt, ob es unter bestimmten Bedingungen doch zum Flackern kommt, mehr dazu im Kapitel Dimmen. Die Zuleitung vom Trafo zum Leuchtmittel ist für elektromagnetisch ungeschirmte Kabel auf 2 Meter begrenzt (Skin-Effekt, Antennen-Effekt), was oft für Platzprobleme beim Verbau des Netzteils sorgt.

7.4. LED-Betrieb mit Gleichstrom

Die meisten LED-Leuchten werden mit LED-Konvertern (Drivers) betrieben, die den Wechselstrom in einen Gleichstrom konvertieren. Diese Konverter sind Schaltnetz-teile, sie arbeiten wie elektronische Trafos, mit dem Unterschied, dass die herunter transformierte Wechselspannung anschließend noch durch einen Gleichrichter (z.B. Schottky-Diode, Brückengleichrichter, etc.) läuft. Nach dem Glätten steht der LED dann Gleichstrom zur Verfügung.

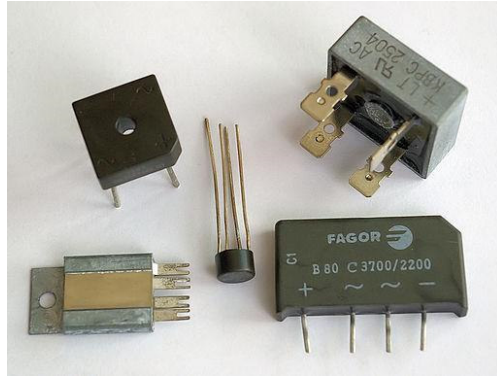


Abbildung 7.15.: Bridge Rectifier in diversen Bauweisen

Das grundlegende Prinzip baut auf die Sperrwirkung der Diode:

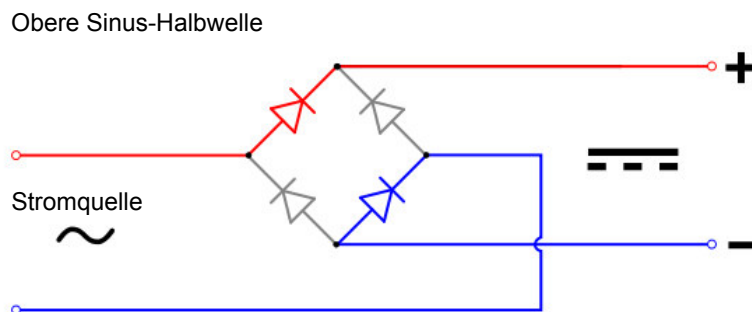


Abbildung 7.16.: Brückengleichrichter erste Sinus-Halbwellle

In den beiden Abbildungen (oben/unten) erkennt man die Wirkungsweise eine Brückengleichrichters, durch die verschiedenfarbige darstellung der Stromrichtung auf der Eingangsseite.

7. Betreiben und Ansteuern der LED

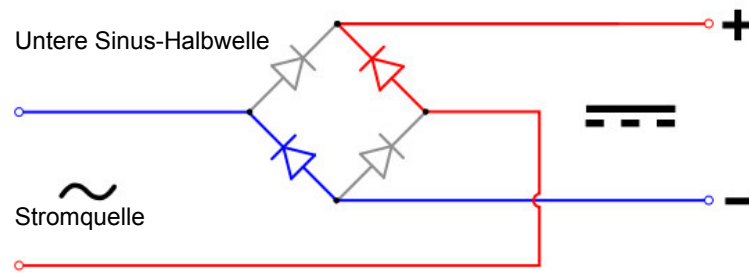


Abbildung 7.17.: Brückengleichrichter zweite Sinus-Halbwellen

Die gleichgerichtete Wechselspannung ist nach dem Gleichrichter aber alles andere als konstant, sondern pulsartig mit variierenden Werten, wie man in der Abbildung sieht:

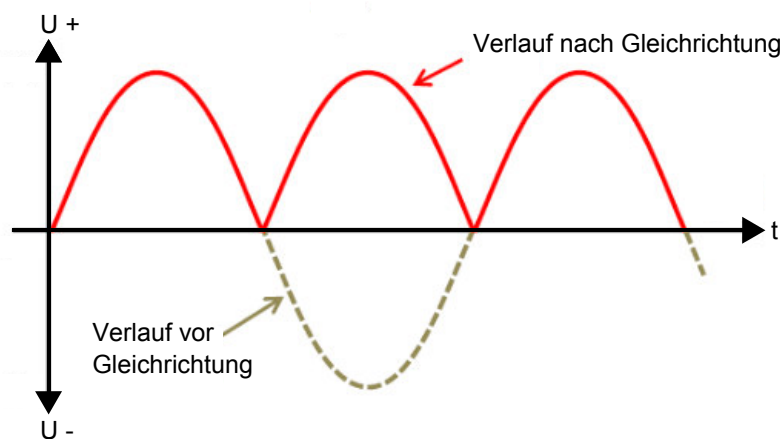


Abbildung 7.18.: Ergebnis nach dem Gleichrichter

Nach dem Gleichrichten wird die Spannung mit einem parallel geschalteten Glättungskondensator (und einem Widerstand bei RC-Siebschaltung) geglättet, damit die Wellenhaftigkeit weniger wird:

Die Hersteller decken bei Konstantspannung-Konvertern diverse Spannungsbereiche und maximale Höhen auf der Sekundärseite ab, neben den 12VDC sind vor

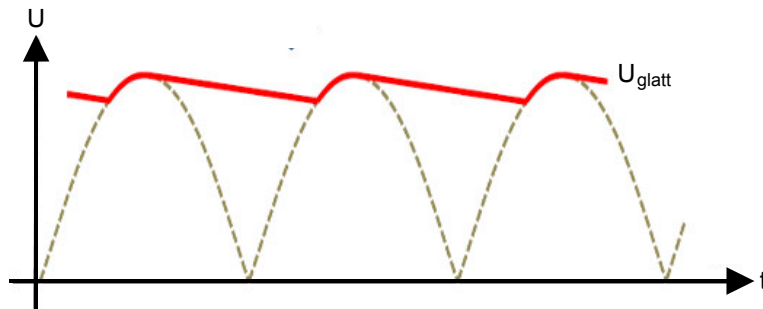


Abbildung 7.19.: Glättung der gleichgerichteten Spannung

allem 24V, 36V, 48V im Einsatz. Je nach maximaler Nennleistung und Güte der Bauteile wirkt sich das auf die Abmessungen der Geräte aus. Eine weitere Rolle spielt das Einsatzgebiet. In Feuchträumen, wo eine höhere Schutzklasse gefordert ist, müssen die Konverter entsprechend gekapselt sein. Die Konverter sind meist wie die Trafos in Kunststoff- oder Metallgehäusen verbaut (in gekapseltem Zustand z.B. in Kunstharze vergossen), bei höheren Wattagen Nennleistung werden auch Lüfter zur aktiven Kühlung eingesetzt. Hier sollte man beim Einsatz prüfen, ob eventuell eine unerwünschte Geräuschentwicklung entstehen kann... LED-Konverter sollten wie die Trafos mit entsprechenden eindeutigen, aussagekräftigen Angaben und Prüfzeichen versehen sein. Schaltnetzteile erzeugen Blindleistung, deshalb sieht der Gesetzgeber in der EU ab 75W Nennleistung aktive EMV-Gegenmaßnahmen vor, um das Stromnetz vor zu viel Blindleistung zu schützen.

7.4.1. Blindleistungs-Problematik

Das Problem der Blindleistung, die wie erwähnt beim Betrieb von elektronischen Trafos und Schaltnetzteilen (LED-Konverter) entsteht, kann unter Umständen für längere Zeit unsichtbar bleiben und wird daher von vielen unterschätzt...

7.4.1.1. Einschub: Woher kommt die Blindleistung?

Mit Blindleistung wird die elektrische Energie bezeichnet, die zwar im Netz fließt, aber nicht verbraucht wird. Eigentlich sollte nur soviel Energie fließen, wie sie vom Verbraucher "gezogen" wird. Allgemein definiert man in der Physik die in einer bestimmten Zeitdauer umgesetzte Energie als Leistung. Umsetzung heißt, dass die

7. Betreiben und Ansteuern der LED

Energie eine andere Form annimmt, z.B. Strom wird zu Beleuchtungszwecken in Licht und Wärme umgewandelt. Elektrische Leistung $P(W)$ ist als das Produkt von Stromstärke $I(A)$ und Spannung $U(V)$ definiert.

Bei periodisch wechselnder Stromrichtung ist die Leistung eine Augenblickleistung $P(t)$ aus dem Produkt des Augenblickwertes der Stromstärke $I(t)$ und Spannung $U(t)$. Beim Gleichstrom ist der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung in jedem Augenblick gleich hoch und immer linear. Linear heißt, dass das Verhältnis zwischen U und I konstant bleibt.

Bei Wechselstrom besteht dieser lineare Zusammenhang nur unter der Voraussetzung von Ohm'scher Last, wo Spannung und Stromstärke gleichphasig verlaufen. Nur bei Ohm'schen Verbrauchern wird die gesamte Energie des gezogenen Wechselstroms auch vom Verbraucher eins zu eins umgesetzt. Im Bild unten sind Spannungs- und Stromverlauf des einphasigen Wechselstromes eingezeichnet. Die resultierende momentane Leistung (P) ergibt sich aus dem Produkt der beiden Momentan-Werte.

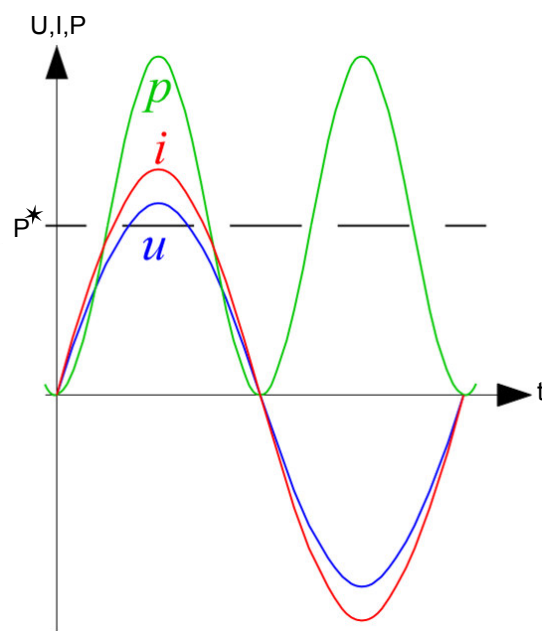


Abbildung 7.20.: Leistung bei Ohm'scher Last

Anders als bei Ohm'schen Bedingungen wird bei induktiver und bei kapazitiver Last ein bestimmter Teil der Netzenergie nicht in wirksame Leistung umgesetzt,

7.4. LED-Betrieb mit Gleichstrom

sondern fließt wieder zurück ins Netz. Dieser ungenutzte Teil heißt Blindleistung. Die Blindleistung entsteht allein schon durch Effekte der Phasenverschiebung. Bei Phasenverschiebung läuft der Strom entweder der Spannung zeitlich versetzt voraus, oder nach.

Bei induktiver Last läuft der Strom der Spannung um eine Viertel Periode nach. Der induktive Verbraucher (Spulen, gewickelte Trafos,...) baut beim Stromdurchfluss ein magnetisches Feld auf. Dazu verbraucht er Energie / Leistung, die dem Verbraucher nicht mehr zur Verfügung steht und es kommt im Ergebnis zu einer Verzögerung des Stromflusses hinsichtlich der ursächlichen Spannung.

Ändert sich die Stromrichtung, stoppt der Aufbau des Magnetfeldes, dieses baut sich wieder ab und die Energie des Magnetfeldes wird ins Netz zurückgespeist. Durch den periodischen Stromwechsel entsteht (Verschiebungs-) Blindleistung. In der Praxis bedeutet das, dass zwischen scheinbarer und echt wirksamer Leistung unterschieden werden muss. Die Scheinleistung wird in VA (Volt-Ampere) angegeben, die Wirkleistung in Watt.

$$\text{Scheinleistung} = \text{Wirkleistung} + \text{Blindleistung}$$

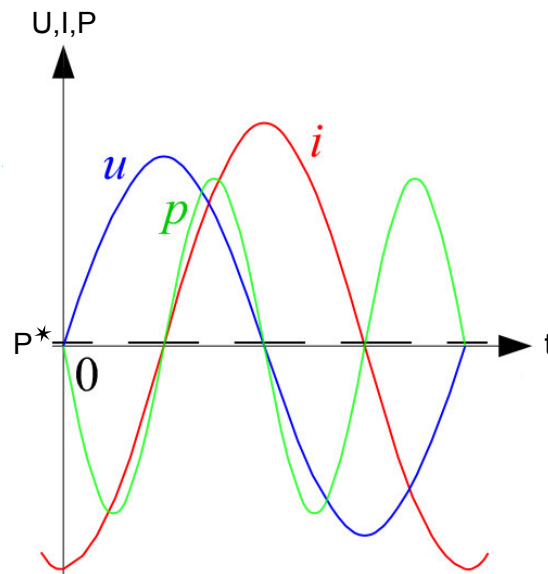


Abbildung 7.21.: Leistung bei induktiver Last

Ähnliches passiert beim Kondensator (Capacitor): Kapazitive Verbraucher, hauptsächlich sind das Kondensatoren, aber auch Erdkabel, bauen ein elektrisches Feld auf und

7. Betreiben und Ansteuern der LED

wieder ab. Die zum Aufbau verwendete Energie kann vom Verbraucher nicht als Wirkleistung genutzt werden und wird beim Abbau ins Netz zurückgespeist. Bei kapazitiven Lasten ist die Phase in die andere Richtung verschoben, der Strom eilt der Spannung voraus.

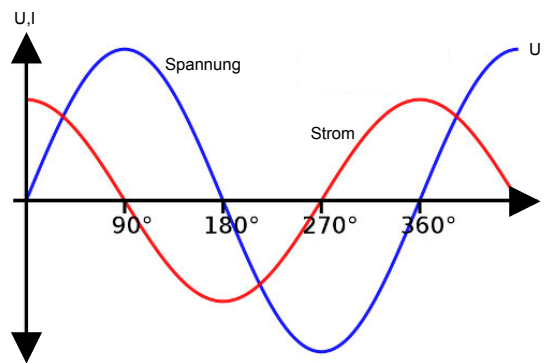


Abbildung 7.22.: Phasenverschiebung bei Kapazitiver Lastcharakteristik

In der Realität hat der Strom aus dem Netz nicht diese ideale Sinusform wie im Bild oben. Durch Oberschwingungen, die z.B. durch die Gleichrichter der Netzteile hervorgerufen werden, entsteht zusätzliche Blindleistung, sogenannte Verzerrungsblindleistung (Oberschwingungs-Blindleistung).

7.4.1.2. Maßnahmen gegen Blindleistung

Die Gegenmaßnahmen zur Erzeugung von Blindleistung werden als Leistungsfaktorkorrektur (PFC Power Factor Correction) bezeichnet. Mit mehreren geeigneten passiven Filtern (Tiefpass mit Drosseln) kann für kleine bis mittlere Nennleistungen eine ausreichende Annäherung an die Sinuskurve erreicht werden. Noch besser geht das mit aktiver Leistungsfaktorkorrektur, wo mit aufwändigeren Schaltungen quasi ein zusätzliches Schaltnetzteil, bestehend aus Gleichrichtern und Aufwärtswandlern, vor das eigentliche gebracht wird. Durch diese Maßnahmen ist es möglich, den Leistungsfaktor ($\cos \varphi$), d.h. das Verhältnis zwischen Wirkleistung und Scheinleistung, bis auf einen Wert in die Nähe von 1 (0,98) zu bringen. Schaltnetzteile mit aktiver PFC sind anderen qualitativ überlegen. Die Angabe zum Leistungskorrekturfaktor (Wirkleistungsfaktor) ist bei besseren Geräten ab 70VA i.d.R. sichtbar.

Die Unterscheidung zwischen kapazitiver oder induktiver Last kann für Geräten mit elektronischen Bauteilen wie Konverter, Trafos, Dimmer, etc. nicht so eindeutig

7.4. LED-Betrieb mit Gleichstrom

getroffen werden, da regelmäßig Bauteile beider Last-Charakteristika verwendet werden. Es geht also mehr darum, welche Lastart überwiegt. Bei Schaltnetzteilen überwiegt die kapazitive Last, deshalb sollte auch ein kapazitiver Dimmer verwendet werden, um die LED mit ihrer kapazitiven Charakteristik optimal anzusteuern.

LED-Konverter gibt es in zwei verschiedenen Versionen am Markt: Entweder geben sie eine konstante Spannung, z.B. von 24V aus, oder sie halten die Stromstärke auf einen konstanten Ausgabewert, z.B. auf 500 mA. Das Design des LED-Moduls muss entsprechend darauf ausgelegt sein. Handelt es sich um eine reine Serienschaltung, ist ein Konstantstrom-Konverter (CC-Driver) gefordert, denn nach dem Prinzip der Serien-/Reihenschaltung stellt sich die Spannung bei konstantem Strom entsprechend der Anzahl und Größe der Widerstände ein. Handelt es sich um parallel geschaltete LED-Reihen, braucht es demzufolge eigentlich einen Konstantspannungs-Konverter (CV-Driver), da in jeder Reihe mit gleicher Anzahl an LEDs die gleiche Spannung herrschen soll. Für den Endkunden ist diese Unterscheidung kaum relevant, da sie vom Lampen-/Leuchtenhersteller vorgegeben wird, falls der Konverter extra zu beziehen ist. Die Angabe der Milliampere erfordert einen entsprechend konzipierten CC-Treiber, die Output-Volt Angabe einen CV-Treiber. Jetzt kann man sich fragen, warum beide Systeme im Einsatz sind, bzw. ob nicht eines von beiden vorteilhafter wäre...

Egal welche Charakteristik benötigt wird, ein guter Konverter sollte gegen Kurzschluss, Übertemperatur, Überlast und Verpolung geschützt sein und intelligent darauf reagieren, in dem er bei Übertemperatur/Überlast herunter regelt, bzw. bei Kurzschluss bald automatisch den vollen Betriebszustand wiederherstellt.

7.4.2. Betrieb mit Konstantspannung-LED-Konvertern

Bei diesem weit verbreiteten Typus „Schaltnetzteil“ wird eine konstante Spannung abgegeben, unabhängig von der Eingangsspannung und der tatsächlichen Last auf der Ausgangsseite, die die Stromstärke dort bestimmt. Wichtig ist, dass die Leistung der LED-Engine kleiner als die Ausgangsleistung des Konverters ist. In der Praxis sollte man bei der Dimensionierung / Auswahl der Konverterleistung immer etwas Luft nach oben lassen, z.B. mit 15 Prozent LED-Last unterhalb der Konverter Nennleistung ist man auf der sicheren Seite. Wird ein weiteres Gerät wie ein Controller oder Dimmer zwischen Konverter und Leuchte geschaltet, muss auch dessen Eigenverbrauch in der Bemessung berücksichtigt werden. Wer auf gute Qualität der Treiber achtet, tut auch den LEDs einen Gefallen, außerdem sollten die Umgebungsbedingungen (trocken, feucht, nass, brennbar, Platzverhältnisse, etc.) unbedingt bei der Auswahl in Betracht gezogen werden. Je größer und bekannter der

7. Betreiben und Ansteuern der LED

Treiber-Hersteller, desto wahrscheinlicher sind gute Produkte, je unbekannter und je weniger Herstellerinformationen und Zertifikate vorhanden sind, desto potentiell unsicherer ist die Investition. Gute Treiber sind selbstredend selten die günstigsten, umgekehrt sagt ein hoher Preis noch gar nichts aus. Ein gutes Schaltnetzteil verbraucht im Ruhezustand keinen Strom, da es ohne Last selbst abschaltet. Am besten testet man, soweit das möglich ist, den passenden Konverter, z.B. ggf. mit passendem Dimmer, um zu sehen ob die LEDs flackern, der Konverter brummt/singt oder etwa verdächtig warm wird.

Mit der Ausgabeleistung der Konverter steigen auch die Abmessungen, besonders bei 12V-Geräten, da sie höhere Ströme verarbeiten müssen. Kleine Abmessungen für relativ hohe Leistung machen sich oft im Preis bemerkbar, da Bauteile und Engineering teurer werden. Beim Einsatz von DALI- oder DMX-Dimmverfahren kann man bereits entsprechend dafür ausgerichtete Konverter kaufen. Manche Hersteller bieten auch Konverter an, die Module für PWM-Dimmung im Konverter innen-seitig verbaut enthalten und dafür gekennzeichnete Ausgänge bereit stellen, die mit Potentiometern oder Tastern angesteuert werden können. Diese extra Features haben natürlich ihren Preis. Einen Hersteller kenne ich, der wenige Konverter in seinem Sortiment anbietet, die man sogar primärseitig mit Phasenabschnittdimmer betreiben kann. Mehr zum Dimmen an späterer Stelle. Andere Modelle enthalten zur Feinjustierung der unteren Dimmgrenze ein eingebautes Potentiometer.



Abbildung 7.23.: LED-Konverter, IP67 und IP20 Ausführung

Immer wieder wird die Frage gestellt, ob man auch mehrere Konverter parallel zusammenschließen kann, um eine entsprechende Vervielfachung der Nennleistung zu erhalten: Tun Sie das bitte nicht! Das hat mehrere Gründe: u.a. wird die Frequenz des Ausgangsstroms niemals exakt gleich sein, was zu heftigen Verzerrungen/Rückkopplungen führt und mindestens eines der parallel geschalteten Geräte schnell Schaden nimmt und ausfällt. Auch aus finanziellen Gründen macht so eine Verschaltung keinen Sinn, kaufen Sie lieber einen passenden Konverter. Mehrere Konverter können nur durch adäquate Aufteilung der LED-Last, also Mehrfach-Einspeisung, gleichzeitig betrieben werden.

7.4.3. Betrieb mit Konstantstrom-Konvertern

Die Konstantstrom-Konverter unterscheiden sich rein äußerlich nicht von ihren Verwandten, man muss schon auf die Herstellerangaben achten, z.B. um festzustellen, welche Stromstärke konstant gehalten wird und bis zu welcher maximalen Spannung oder Leistung dies erfolgen kann.



Abbildung 7.24.: Konstantstrom-Konverter, re. Universal-Konv. mit DIP-Schaltern

Wird vom Lampen-/Leuchtenhersteller z.B. ein 750mA-Treiber für die LED-engine vorgesehen, kann man die LED in aller Regel theoretisch auch mit einem kleiner bemessenen wie z.B. einem 500mA-Konverter betreiben. Der geringere Strom an jeder LED bewirkt aber entsprechend eine relativ geringere Leistung, d.h. Die LED leuchtet nicht so hell wie ursprünglich beabsichtigt – lebt aber dafür sicher wesentlich länger... Dieses Konzept wird von einigen Leuchtenherstellern bei COB-Bauweise der Leuchte durch konfigurierbare Konverter mit DIP-Schaltern (Mäuseklavier) für verschiedene Helligkeitsansprüche eingesetzt. Anscheinend ist es für den Hersteller manchmal ökonomischer, grundsätzlich den leistungsstärksten und somit teuersten COB mit einem stellbaren CC-Konverter zu verbauen, statt verschieden groß dimensionierte Konfigurationen aus COB-engine und Konverter bereitzuhalten.

Umgekehrt darf die maximal bemessene Stromstärke bzw. Ampere-Höhe nicht leichtfertig durch Umbauten überschritten werden, weil sehr wahrscheinlich das Gesamtdesign nicht auf so hohe Ströme ausgerichtet ist.

Welche Vorteile hat nun das Konstantstrom-Konzept?

Die wichtigsten Argumente sind, dass jede LED auch ohne Vorwiderstand vor Überstrom geschützt wird und jede (annähernd) gleich hell leuchtet, weil die gleiche Menge an Strom fließt, unabhängig von Stromschwankungen der Quelle. Konstantstromquellen werden vor allem für COB-Module und LED-engines mit mehreren LEDs eingesetzt, wie sie die Leuchtenindustrie für Downlights und Strahler einsetzt.

7. Betreiben und Ansteuern der LED

Ein Konstantstrom-Konverter kann technisch auf verschiedene Weise konzipiert sein, im einfacheren Fall werden Bipolar- oder Feldeffekt-Transistoren (FET) eingesetzt, die sich wie ein differentieller Widerstand im sehr hohen Bereich verhalten. Weiterhin können z.B. auch Operationsverstärker, Integrierte Schaltkreise oder Schaltnetzteile mit Drossel dafür eingesetzt werden.

Wenn mehrere Leuchten/Lampen/LED-engines, die auf Konstantstrom ausgelegt sind, miteinander, d.h. mit einem gemeinsamen Konverter betrieben werden sollen, sind zwei Dinge zu beachten:

1. Der CC-Konverter sollte die Maximallast aller Leuchten im Bereich deutlich unterschreiten und 2. die Leuchten müssen natürlich auch in Reihe/Serie zueinander am Konverter angeschlossen werden. Das bedeutet rein praktisch, dass der negativ gepolte Ausgang von Lampe 1 an den positiv gepolten Eingang von Lampe 2 usw. gelegt werden muss.

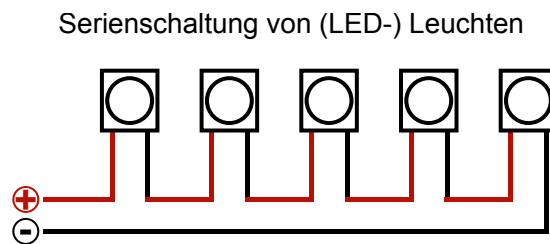


Abbildung 7.25.: Anschluss-Schema-CC

Die Qualität der Konstant-Strom- wie auch die der Konstant-Volt Konverter, die am Markt angeboten werden, oder in der Leuchte fest verbaut sind, kann unabhängig vom verwendeten technischen Prinzip stark variieren. Das hängt vor allem an der Qualität der verwendeten elektronischen Bauteile und dem zugrundeliegenden elektronischen Design. Beides ist von außen nicht zu beurteilen. Sollte z.B. eine auffällig günstige LED-Leuchte mit einem „No-Name“-Schaltnetzteil ausgestattet sein, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass auch hier der günstige Einkaufspreis auf Kosten der Qualität geht und die Vorschaltel Elektronik der tatsächlich limitierende Faktor für die Lebenszeit der LED-Leuchte wird. Daneben können unangenehme Störungen im Radio-Frequenzbereich auftreten.

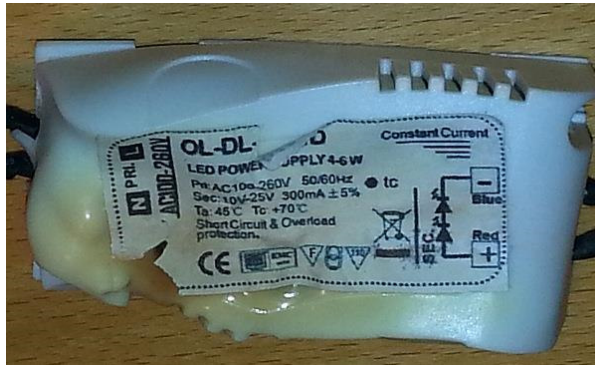


Abbildung 7.26.: durch Überhitzung zerstörter Billig-CC-Konverter

7.5. LEDs ansteuern

„Licht aus – Licht an“ berücksichtigt nur die rein praktischen Gesichtspunkte künstlichen Lichts, damit wir sehen, wo wir hingehen oder was wir machen... . Licht hat aber auch einen sinnlichen Charakter, z.B. kann es mit veränderlichen Helligkeiten unterschiedliche Stimmungen schaffen und das Beleuchtete dabei unterschiedlich in Szene setzen. Die Dimmbarkeit von Leuchten im Wohn- oder Arbeitsbereich wird daher immer gefragter. Dimmen (dim = engl.: Abblenden/herunter-regeln) heißt, die Helligkeit möglichst stufenlos auf einen beliebigen Wert (meist nach unten) zu ändern. Damit kann man angenehme Stimmungen erzeugen, oder z.B. von Arbeitslicht auf eine minimale Grundbeleuchtung wechseln. Bei LED-Retrofits ist die Dimmfähigkeit ein wichtiges Verkaufsargument, zumal die sogenannten Energiesparlampen / Kompaktleuchtstofflampen regelmäßig nicht dimmbar waren. Leider wird es von den Herstellern dann oft vergessen auch deutlich darauf hinzuweisen, dass der konventionelle, bereits verbaute Dimmer dafür meist nicht geeignet ist.

Unsere Erwartung an dimmbares Licht orientiert sich am bekannten Dimmverhalten der Glühbirne. Dimmt man Glühbirnen auf ca. die Hälfte herunter, fließt so wenig Strom durch den Wolframdraht, dass mit der Leuchtkraft auch die Weißglut verschwunden ist. Der geringere Stromdurchfluss und damit eingehende Lichtverlust macht sich auch in einer Rotverschiebung der Lichtfarbe bemerkbar, das vorher weißliche Licht wird „wärmer“. Weiße LEDs verhalten sich nicht wie Glühdrähte, denn ihre Lichtfarbe hängt vom Phosphor ab. Werden weniger Photonen emittiert, wird auch weniger Helligkeit, aber immer noch mit der gleichen Lichtfarbe erzeugt.

Wie funktioniert das Dimmen technisch? Eine Glühbirne, die mit Gleichstrom be-

7. Betreiben und Ansteuern der LED

trieben wird, z.B. eine Taschenlampe, kann man relativ einfach, durch Verringerung der Spannung, herunter dimmen: weniger Strom bedeutet weniger Energiefreisetzung. Da beim Glühdraht erst einmal ein genügend hoher Strom durch den Draht fließen muss, bis dieser zu Glühen beginnt und mit zunehmender Energie der Stromfluss stärker behindert wird, ist auch bei der Glühlampe der Zusammenhang zwischen Strom und Helligkeit kein linearer, d.h. eine gedimmte Glühlampe verbraucht mehr Strom als ihrer verringerten Helligkeit entsprechend. Bei LEDs passiert die Leistungsänderung in einem sehr begrenzten Spannungsbereich (siehe Kennlinie). Deshalb wäre eine reine Spannungsänderung mit üblichen Mitteln kaum geeignet, ein adäquat breites und stufenloses Dimmverhalten zu erzeugen.

7.5.1. Dimmen auf der Primärseite

Wahrscheinlich haben auch Sie eine Beleuchtung zuhause, die gedimmt werden kann, z.B. eine Stehlampe, mit Hochvolt - Halogen-Leuchtmittel und Schnur-Schiebedimmer. Nachdem Haushaltsleuchten eben nicht mit Gleichstrom, sondern direkt mit 230 V Netzstrom d.h. Wechselstrom betrieben werden/wurden, überlegen wir uns, wie man den sinusförmigen Wechselstrom geeignet mindern könnte. Zwei Möglichkeiten haben wir bis jetzt kennengelernt: 1. Das Trafo-Prinzip und 2. den Einsatz von Widerständen. Ein gewickelter Stelltrafo, an dem man verschiedene Wicklungen abgreifen könnte, wäre relativ groß und schwer und würde eher nicht in eine Wanddose passen. Deshalb findet diese Art der Spannungsregulierung hier keine Verwendung. Beim zweiten Prinzip würde an den Vorwiderständen viel Leistung abfallen und in Wärmeenergie umgewandelt werden, was ineffektiv und schwer handhabbar wäre, deshalb arbeiten handelsübliche Haushaltsdimmer auch nicht auf diese Weise.

7.5.1.1. Phasenanschnitt-Dimmung

Für Glühbirnen werden sogenannte Phasenanschnitt-Dimmer eingesetzt. Das Grundprinzip, das dahintersteckt arbeitet mit einer nur Millisekunden dauernden Unterbrechung des Stromflusses. Wenn der Stromfluss an mehreren Stellen für sehr kurze Zeit nicht stattfindet, bedeutet das im Ergebnis weniger verrichtete elektrische Arbeit bzw. hier Lichtleistung. Obwohl für kurze Momente kein Strom fließt, geht die Glühbirne in dieser Zeit nicht aus, da der Wolframdraht nicht komplett abkühlen kann. Es stellt sich lediglich eine geringere Durchschnitts-Temperatur im Draht ein, die auch in einer geringeren Farbtemperatur des emittierten Lichts Entsprechung findet. Technisch wird dies mit einem TRIAC gemacht, das ist eine Triode für Wechselstrom (AC), also auch ein Halbleiterbauelement. TRIACs werden zur Phasenanschnittdimmung und zur Leistungs-Regelung von Elektromotoren (Bohr-

maschine, Rührstab, etc.) eingesetzt. Dimmer mit Phasenanschnitt-Regelung sind relativ leicht und kompakt. Bei uns werden sie als Drehdimmer oder Tastdimmer eingesetzt, in anglo-amerikanischen Ländern häufig als Schieberegler. Phasenanschnittdimmer erkennen, wann die Wechselstromspannung auf den Wert Null abfällt und sperren den Strom so lange, bis der Triac ab dem angewählten Zeitpunkt (1) „zündet“ und den Strom wieder (mit normalem Sinusverlauf) bis zum nächsten Nulldurchgang weiterleitet.

In der Graphik unten ist zu sehen, wie die jeweilige positive oder negative Halbwelle immer im ansteigenden Kurvenbereich angeschnitten wird. Deshalb spricht man auch von einer Anschnitt-Steuerung. Verschiedene Dimmzustände werden so realisiert, in dem man den Zündzeitpunkt (1) verschieden spät einstellt. Je länger die resultierende Auszeit (d) wird, desto geringer ist die mittlere elektrische Leistung. Die jeweilige Höhe der effektiven Leistung kann man graphisch als verbliebene Fläche zwischen Kurvenlinie und t-Koordinate darstellen. Mit einer größeren Auszeit „d“ schrumpft entsprechend die Fläche unter dem Graphen und somit die Leistung.

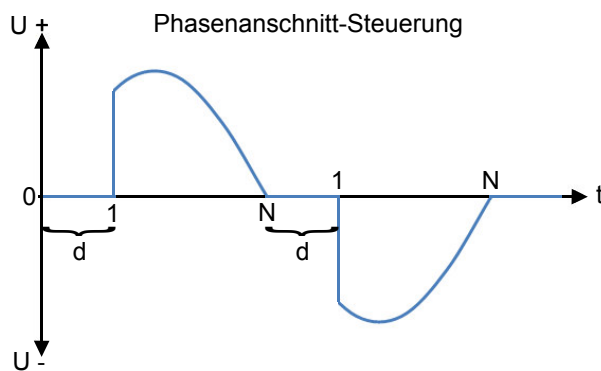


Abbildung 7.27.: Phasenanschnitt-Dimmung

Phasenanschnittdimmer sind für Ohm'sche Verbraucher („R“) problemlos geeignet, da Spannung und Stromstärke in Phase sind. Für induktive Verbraucher („L“), z.B. Halogenlampen an Spulenträfos, sind sie gut geeignet, nicht aber für kapazitive Verbraucher („C“), wie LEDs bzw. deren Vorschaltgeräte. Die Ursache liegt in der schon angesprochenen Problematik der Phasenverschiebung. Im Bild unten ist dies am Beispiel einer kapazitiven Leistungscharakteristik dargestellt, wo der Strom der Spannung um neunzig Grad versetzt voraus läuft. Schneidet man hier die Phase an, beginnt der Stromfluss nach der Triac-Zündung bereits mit einem hohen Einschaltwert, was Kontakte und Bauteile nachhaltig schädigt.

7. Betreiben und Ansteuern der LED

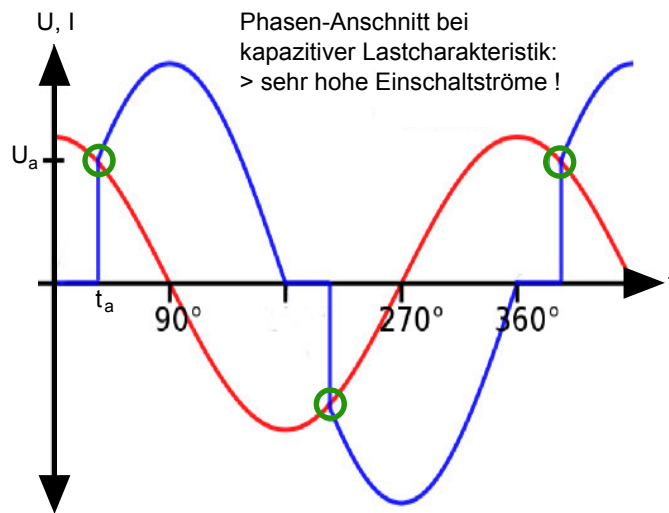


Abbildung 7.28.: Dimmung von kapazitiver Last mit Phasenanschnitt

Wichtig: Auch wenn es in manchen Fällen möglich sein wird, eine LED-Lampe mittels Phasenanschnitt-Dimmung flackerfrei anzusteuern, ist davon eigentlich grundsätzlich abzuraten: Beim LED-Betrieb mit Konverter/Trafo und Phasenanschnitt-Dimmung kann es wegen des hohen Einschaltstromes leicht zur Überhitzung des Eingangskondensators beim Schaltnetzteil kommen. Lampenhersteller, die damit werben, dass man Phasenanschnittdimmung einsetzen kann, haben entweder zusätzliche geeignete Vorschalt elektronik verbaut (Dämpfer, Spannungsteiler etc.), die die Stromspitzen reduziert, oder arbeiten ganz ohne Kondensatoren (Bsp. 230VAC, wobei auch hier andere Dimmverfahren zu bevorzugen sind), oder erzählen Seemannsgarn.

7.5.1.2. Phasenabschnitt-Dimmung

Phasenabschnittdimmer schneiden die Sinuswelle im absteigenden Bereich ab. Je früher die Spannung auf Null abfällt, desto weniger hell leuchtet unsere LED, weil die Auszeit entsprechend länger wird. Die Phasenabschnittdimmung ist wesentlich besser für die Steuerung kapazitiver Lasten geeignet, da die Spannungskurve im Nullpunkt beginnt, die Spannung langsam aufgebaut wird und im Abstiegsbereich plötzlich zusammenbricht.

Phasenabschnitt-Dimmer benötigen aufwändigere Schaltungen und Bauteile (Power-MOSFETs, GTO-Transistoren,...) und sind durch ihren entsprechend höheren Kaufpreis im Vergleich zum Triac (Anschnitt-Dimmer) daher relativ unbeliebt. Noch

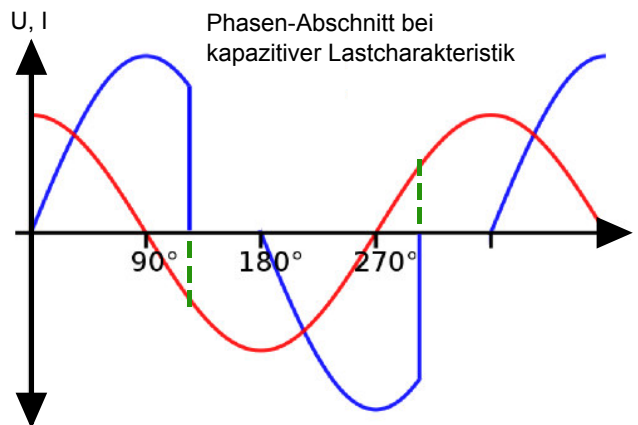


Abbildung 7.29.: Dimmung von kapazitiver Last mit Phasenabschnitt

teurer sind sogenannte Universaldimmer, die erkennen, welche Lastart anliegt und dann entsprechend mit Anschnitt- oder Abschnittsteuerung reagieren. (Wichtig: auch bei Universaldimmern immer nur eine Lastart gleichzeitig betreiben!)

Schaltnetzteile besitzen zwar kapazitive und induktive Bauteile (kleiner Spulen-Trafo), die kapazitive Charakteristik überwiegt aber i.d.R. eindeutig, weshalb die Phasenabschnittsteuerung notwendig wird.

Einschub: Verständnis-Fragen

Frage 1: was würde passieren, wenn man eine induktive Last statt mit einem Phasenanschnitt- mit einem Phasenabschnittdimmer ansteuern würde?

Im Bild unten ist gut zu erkennen, dass im Ausschaltzeitpunkt der Strom, wegen der Phasenverschiebung nach hinten, hoch ist und sogar noch weiter ansteigt. Man kann sich vorstellen, dass hohe Ausschaltströme ähnlich wie hohe Einschaltströme zerstörerisch wirken ...

Antwort zu 1: Phasenabschnittsteuerungen sind wegen der hohen Ausschaltströme nicht für induktive Lasten geeignet.

Frage 2: Auf welche der zwei vorgestellten Dimmverfahren sollte man zurück greifen, wenn man die 230V-AC-LEDs ohne vorgeschaltete kapazitive Bauteile wie Kondensatoren etc. betreibt?

7. Betreiben und Ansteuern der LED

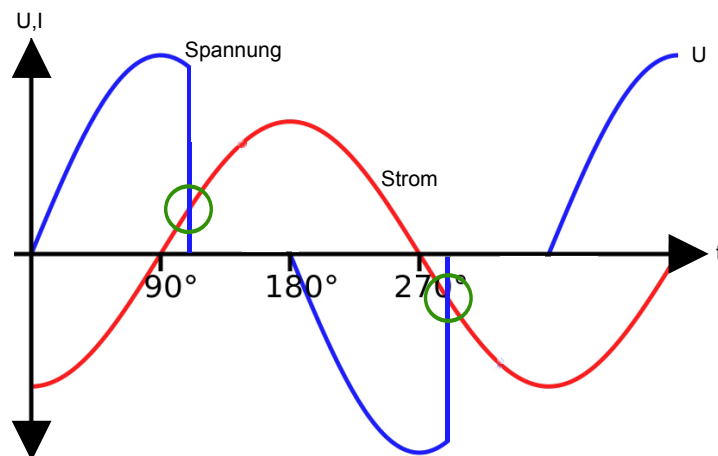


Abbildung 7.30.: Dimmung von induktiver Last mit Phasenabschnitt

Zur Beantwortung müssten wir wissen, welche Last-Charakteristik die LED selbst besitzt...

Im Kapitel „Elektrisches Verhalten der LED“, wurde schon erklärt, dass die LED aufgrund ihres spezifischen Bandabstandes eine entsprechend spezifische Sperrschichtkapazität besitzt. Zusätzlich kommt eine sogenannte Diffusionskapazität dazu. Sie entsteht durch den jeweiligen Ladungsüberschuss in den unterschiedlich dotierten p-/n-Bereichen, der bei Spannungsänderungen erst einmal ab- bzw. aufgebaut werden muss (positiver Bereich = „Löcher“ (=Defektelektronen), negativer Bereich = Elektronen). Im Effekt macht sich die Diffusionskapazität als kaum sichtbare Trägheit der LED/Diode auf Spannungsänderungen bemerkbar. Auch wenn die Eigenkapazität der LED im Vergleich zu den kapazitiven Vorschaltgeräten relativ gering ist, handelt es sich dennoch um eine kapazitive Last.

Antwort zu 2: Man sollte auch für das Dimmen von AC-LED-Arrays ohne elektronischen Trafo Phasenabschnittdimmer verwenden.

Das Dimmen auf der Primärseite wird vor allem im Retrofit-Bereich nachgefragt, z.B. dann, wenn die Leuchten, Leitungen und Wandschalter bereits vorhanden sind. Ein Tausch der Leuchtmittel und des Phasenanschnitt- gegen einen Phasenabschnitt-Dimmer bringt dann die gewünschten Ergebnisse, wenn die LED-Leuchtmittel dimmbar sind. Aus meiner Erfahrung heraus kann ich nur raten: vertrauen Sie diesen

Angaben nicht blind, sondern probieren Sie unbedingt die Eignung der als dimmbar gekennzeichneten Leuchtmittel mit dem entsprechend gewählten Phasenabschnitt-Dimmer aus. Die großen LED-Leuchtmittel-Hersteller geben i.d.R. (z.B. auf den Webseiten) an, mit welchen Fabrikaten die Dimmung gut funktioniert und mit welchen nicht oder nur schlecht. Je nachdem, welche Bauteile (Gleichrichter, Spannungswandler, Filter, etc.) und mit welcher Güte diese im Leuchtmittel zum Einsatz kommen, erreicht man gute, schlechte (kleiner Dimmbereich, Flackern an bestimmten Helligkeits-Positionen, Geräuschentwicklung,...) oder gar keine Dimm-Ergebnisse.

Die allermeisten LED-Konverter (CC / CV) sind nicht primärseitig mit Phasenabschnitt dimmbar. Sie ignorieren das gepulste Signal einfach, der Ausweg liegt nur in der sekundär-seitigen Dimmung. Mir ist nur ein größerer Dimmerhersteller bekannt, der einen einstellbaren Universalkonverter anbietet, der tatsächlich mit einem Phasenabschnitt-Dimmer funktioniert, allerdings nur bis zu einer Leistung von 20-35W je nach Signalart (CV/CC) und das Ganze liegt wegen des höheren elektronischen Aufwands in der oberen Preisklasse.

Kommt ein elektronischer Trafo für 12V-LED-Leuchtmittel zum Einsatz, erfordern seine überwiegend kapazitiven Bauteile einen Phasenabschnitt-Dimmer. Für LEDs sollten nur Trafos ohne Mindestlast verwendet werden.

Auf Dimmern (und vielen Schaltnetzteilen) aus EU-Produktion wird die Last-Charakteristik einheitlich mit entsprechenden Symbolen gekennzeichnet, die stets zusammenpassen müssen:

Standard- Phasenabschnitt- Dimmer	Niedervolt- Phasenabschnitt- Dimmer	Phasenabschnitt- Dimmer	Universal- Dimmer
			

Abbildung 7.31.: Symbolik Lastcharakteristik

7.5.2. Dimmen auf der Sekundärseite mit PWM

Während bei der primär-seitigen Dimmung die Leistung vor dem Strom- bzw. Spannungswandler geregelt wird, erfolgt dies auf der Sekundärseite nach dem Konverter, also wenn gleichgerichteter Strom im Niederspannungsbereich vorliegt.

7. Betreiben und Ansteuern der LED

Das sogenannte PWM-Verfahren ähnelt vom Prinzip her den beiden oben vorgestellten, da der konstante Stromfluss durch Ein- und Ausschalten unterbrochen wird. Mit unterschiedlich langen (Spannungs-) Auszeiten der (relativ) konstanten Spannung wird die Leistung des Verbrauchers bei gleicher Frequenz (die Periode aus On und Off ist stets gleich) geregelt.

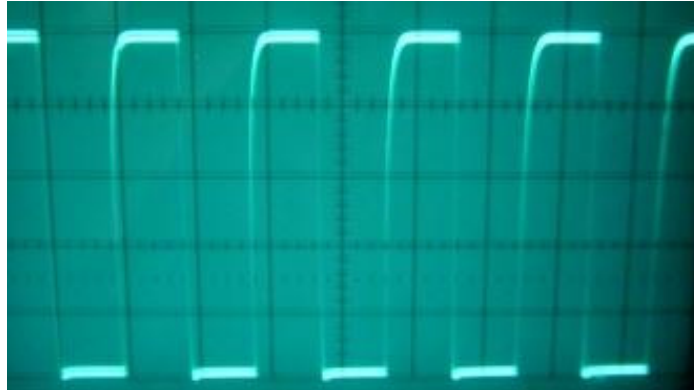


Abbildung 7.32.: Signal einer Pulsweitenmodulation

PWM steht für Pulsweitenmodulation (Pulse-width-modulation) und bedeutet eine Taktung zwischen entweder Null Volt für den Aus-Zustand oder x-Volt, dem entsprechenden fixen Spannungs-Wert. Die Dauer des Stromflusses nennt man Pulslänge (-breite). Die Länge/Breite des gepulsten Signals wird entsprechend dem Leistungsniveau eingestellt. Je nach Tastgrad, d.h. absoluten Verhältnis zwischen Einschaltzeit und Ausschaltzeit, bzw. Pulslänge und Pulsperiode, ergibt sich im Ergebnis ein Mittelwert der resultierenden Spannung.

Der größte Vorteil der PWM-Dimmung ist, dass dies mit sehr wenigen Verlusten erfolgt, da im Gegensatz zur Dimmung mit Vorschaltwiderständen oder Abtastspulen kaum Energie in Wärme umgewandelt wird. Das Dimmsignal ist ein analoges, stufenlos verstellbares Signal.

Der größte Nachteil ist, dass sich unerwünschte Oberschwingungen und elektromagnetische Interferenzen (EMI) ergeben. Mit einer Erhöhung der Frequenz wird dieser Effekt aber geringer und durch geeignete Filter für die entsprechende, immerhin konstante, Frequenz können akzeptable Leistungsfaktor-Werte erzielt werden. Für die PWM-Schaltungen werden oft sogenannte IGBTs (Insulated gate bipolar transistors) verwendet.

Das PWM-Modul kann in einem externen LED-Konverter verbaut sein oder als ein

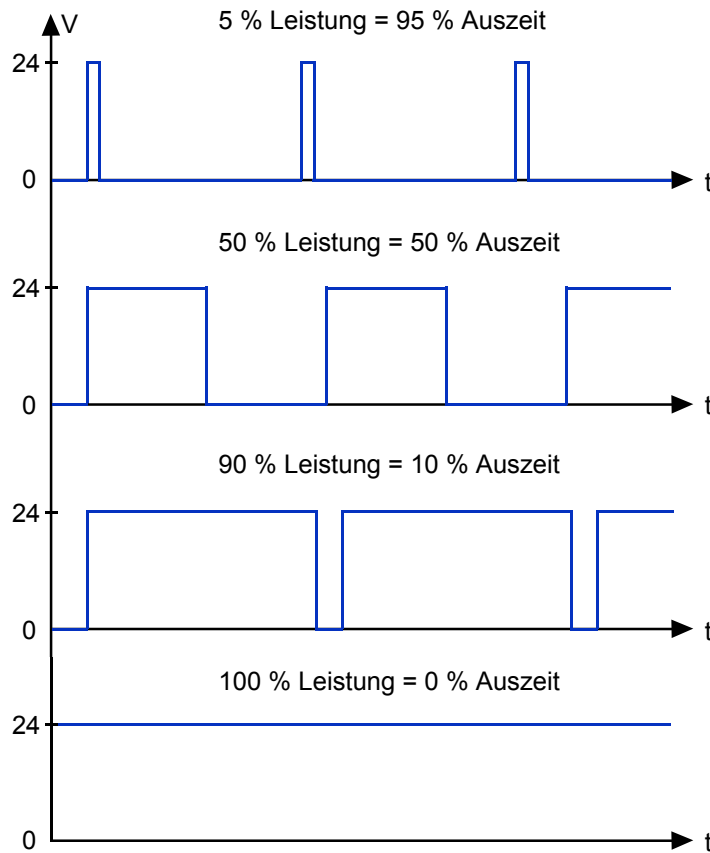


Abbildung 7.33.: Schema Schaltzeiten bei Pulsweitenmodulation

eigenständiges Dimmer-Modul konzipiert sein, das man zwischen LED-Konverter und LED-Leuchte schaltet. Zur elektrischen Ansteuerung des PWM-Moduls benötigt man je nach Modul-Ausführung entweder eine Steuerleitung (1-10V) für ein Drehpotentiometer bzw. einen Taster oder eine Funksteuerung. I.d.R. Können mit einem Drehpoti/PUSH-Taster auch mehrere dafür geeignete Dimm-Module gesteuert werden, in dem man deren Schnittstellen miteinander verbindet / durchschleift.

Frage: Könnte man sekundär-seitig auch mit anderen Verfahren dimmen?

Für Konverter, die auf Konstant-Spannung ausgelegt sind, gibt es keine Alternative. Für Konstant-Strom-Konverter kommt aus rein theoretischen Überlegungen natürlich eine Modulation der Stromstärke in Betracht, denn eine Verringerung der Stromstärke resultiert in einer geringeren Leistungsaufnahme und somit geringeren Leuchtkraft der LED. Weil dieses sogenannte CCR-Verfahren (Constant Current

7. Betreiben und Ansteuern der LED

reduction) aber nicht so präzise und effizient arbeitet, wird es nur für spezielle Anwendungen eingesetzt, wo z.B. kein EMV erwünscht ist oder der Anspruch an den Dimming-Range untergeordnet ist. Beim Vergleich der PWM-Steuerung



Abbildung 7.34.: Simplex PWM-Steuermodul

mit Phasenanschnitt- bzw. Phasenabschnittsteuerung, lässt sich feststellen, dass Pulsweitenmodulation im Ergebnis besser dimmt, weil die Helligkeit problemlos bis auf Null herab gedimmt werden kann.

7.5.3. Lichtmanagement: Steuerprotokolle und Bedienung

Betrachtet man die elektronische Intelligenz, die uns täglich in Form von Handys oder Computern zur Verfügung steht, wirkt die Intelligenz, mit der wir unsere Beleuchtung zuhause steuern vorsintflutlich. Ausgeklügelte Licht-Steueranlagen, wie es sie z.B. traditionell schon lange im Veranstaltungs-, Hotel- und Gastro-Bereich gibt finden sich eher in gewerblich genutzten Büro-Gebäuden wieder. Hier ist Lichtmanagement Teil eines umfassenderen Gebäudemanagements mit intelligenten, digitalen Steuersystemen, das neben Komfort in erster Linie auf die Energieersparnis, d.h. Kostenersparnis abzielt.

7.5.3.1. 1-10V/0-10V Steuerung

Bevor die Digitalisierung mit dem Beginn des Computerzeitalters die Steuerungstechnik erobert hat, waren entsprechend analoge Konzepte im Einsatz. Noch heute ist für einfache Aufgaben, wie das Dimmen eines dafür geeigneten Vorschaltgerätes,

das analoge 1-10V-Steuerverfahren im Einsatz. Das Prinzip ist relativ einfach: mit einem störungs-sicheren DC-Steuersignal von 10 Volt bei ungefähr 0,5 A, das mit einem Potentiometer bis auf 1 V gemindert werden kann wird das Schaltnetzteil oder EVG eingestellt und entsprechend die Helligkeit der Lampe von 100% (10 V, Steuerleitung ist offen) bis auf ca. 10% (1V, Steuerleitung im Minimum des Spannungsbereich) herab geregelt.

Passive Schaltnetzteile erwarten ein fremdes Eingangssignal von 0 bis 10V, wobei 0V das Ausschaltsignal ist, aktive Netzteile generieren selbst das Steuersignal von 10V (1-10V Technik). Der Vorteil dieser Technik ist ihre Robustheit. Der Nachteil ist, dass bei unterschiedlich langen Steuerleitungen für mehrere Lampen im gleichen Raum, Helligkeitsunterschiede entstehen können, weil die geringe Spannung empfindlich auf die Leitungslängen reagiert.

Es gibt von mehreren Herstellern LED-Konverter am Markt, die eine 1-10V Schnittstelle zur Verfügung stellen, das Dimm-Modul ist dann bereits im Konverter integriert. Daneben existieren zahlreiche externe PWM-Dimm-Module, die zwischen Konverter und LED-Lichtquelle geschaltet werden können und eine 1-10V Steuerschnittstelle besitzen. Die Bedienung erfolgt bei dieser Steuerart meist über einen Drehschalter/Drehpotentiometer, mit dem je nach Stellung der Drehachse der Widerstand verändert wird. Die Hersteller des PWM-Gerätes geben i.d.R. geeignete Drehpoti's an.

7.5.3.2. Taster-Steuerung (PUSH)

Viele PWM-Module können alternativ auch mit einem handelsüblichen Taster (Stromstoß-Schalter), wie man ihn für Relais-Schaltungen im Hausflur etc. verwendet, angesteuert werden und stellen dafür eine Push-Schnittstelle zur Verfügung. Bei kurzer Bedienung des Tasters, oder auch in moderner Version eines Touch-Sensors, wird abwechselnd ein EIN/AUS-Impuls an den PWM-Dimmer gesendet, bei längerem Kontakt der Wippe/des Sensors dimmt der PWM entsprechend nach oben oder unten bis zur maximalen/minimalen Leistungsstufe. Taster sind wie die bereits vorgestellten Drehpoti's relativ praktisch, da sie einfach in die bestehende Wandschalterkonfiguration /Verteilerdose passen. Wie auch beim 1-10V-Verfahren braucht es natürlich eine vorhandene geeignete Verkabelung zur Leuchte bzw. die Möglichkeit, nachträglich zusätzliche Steuerleitungen zu ziehen.

7. Betreiben und Ansteuern der LED

7.5.3.3. Funkfernsteuerung

Fernsteuerungen sind eine praktische Sache – wenn die Fernsteuerung sofort zur Hand ist... Zwei Prinzipien zur drahtlosen Übertragung des Steuersignals an den Empfänger / PWM-Dimmer stehen zur Verfügung:

Die Übertragung mittels Radiowellen (RF = radiofrequency) und 2. mittels Infrarotwellen (IF = infrared), das ist unsichtbares Licht, von einer speziellen IF-LED ausgesendet (TV-Steuerung).

Die RF-Steuerung besteht aus einem RF-Controller /RF-PWM-Dimmer zwischen Schaltnetzteil und Leuchte und dem Batterie getriebenen Bedienteil. RF-Steuerungen sind beliebt bei der Ansteuerungen von RGB-Leuchten oder als kostengünstige Lösung für einfaches Dimmen von weiß-farbigen LED-Leuchten.



Abbildung 7.35.: Einfacher 1-Kanal-Funkdimmer

Der technische Unterschied zwischen letzteren Funksteuerungen ist, dass es zur RGB-Farbsteuerung drei verschiedene Funk-Kanäle braucht, entsprechend zur RGB+W-Steuerung vier, und zum einfachen Dimmen ein Kanal ausreicht. Beim entsprechenden Controller/Empfängerteil von RGB-Steuerungen findet sich demzufolge am Ausgang für jede Farbe eine Klemm-Möglichkeit (jeweils +/- oder jeweils farbig gekennzeichnete Plus- mit gemeinsamen Minuspol oder jeweils Minus mit gemeinsamen Pluspol). Funkdimmer gibt es bereits relativ kostengünstig.

Der Unterschied zu den teureren ist, neben der Verarbeitung und technischen Ausstattung, auch der Bedienkomfort. Bei einigen ist die stufenlose Steuerung von



Abbildung 7.36.: Simple Funk-RGB-Steuerung

Helligkeit bzw. Farbe in Abhängigkeit von der Fernbedienung und/oder Controller nur mangelhaft umgesetzt.

Ausprobieren lohnt sich auch hier immer, am besten testet man den Funkdimmer mit Leuchte und dem Konverter zusammen. Beispielsweise werben einige günstige RGB-Controller aus China bei denen das Touch-Bedienfeld als Farbrad gestaltet ist, damit, dass so 64 Tausend Zwischenfarben möglich seien. Diese theoretische, rein rechnerische Zahl kann aber wegen der nur eingeschränkt möglichen Daumenbetätigung des kleinen Farbrads unmöglich umgesetzt werden.

Viele Touch-Bedienteile reagieren sensorisch viel zu ungenau oder manchmal gar nicht, z.B. bei feuchten Fingern, auf die Tast-Eingabe. Funksteuerungen arbeiten auf verschiedenen freigegebenen Frequenzen im Mega- oder Giga-Hertz-Bereich (z.B. 886MHz/2.4 GHz). Manche Frequenzbereiche dürfen jedoch nicht ohne Zulassung genutzt werden, achten Sie daher auf eine entsprechende Zulassungs-Kennzeichnung des Herstellers für das Gerät.

Infrarot-Fernsteuerungen unterscheiden sich rein äußerlich bis auf die optischen Schnittstellen kaum. Sie besitzen aber regelmäßig eine relativ geringere Reichweite, denn die Wellen werden an optischen Hindernissen reflektiert, während Funkwellen einige Baustoffe durchdringen können. IR-Fernbedienungen empfehlen sich daher nur bei „Sichtkontakt-Verhältnissen“ als Alternative.

7. Betreiben und Ansteuern der LED



Abbildung 7.37.: Simple Infrarot-RGB-Steuerung

7.5.3.4. Digitale DALI-Schnittstelle

Für die professionelle Lichtsteuerung kommt seit der Erfindung der EVGs vielfach das DALI-Protokoll zum Einsatz. Der Name steht als Abkürzung für Digital Addressable Lighting Interface, was übersetzt so viel wie „digitale, adressierbare Licht-Schnittstelle“ heißt. DALI stellt den technischen Nachfolger des analogen 1-10V-Verfahrens dar und weist entsprechend mehr Vorteile auf. Da jedes Gerät, z.B. ein Konverter, eTrafo, EVG, Drehpoti, Taster oder Dimmer über eine eigene digitale Adresse individuell ansteuerbar ist, können mit einem Befehl, z.B. einem Dimmbefehl, unterschiedliche Aktionen, z.B. Dimm-Positionen, erreicht werden. Durch den bidirektionalen Charakter des Protokolls kann der aktuelle Zustand des angesteuerten Gerätes abgefragt und bei Bedarf entsprechend verändert werden. DALI arbeitet mit einer Geschwindigkeit von 1,2 Kbit/s und kann in unterschiedlichen Topologien (Stern, Serie, Baumstruktur) bis zu 64 Betriebsgeräte ansteuern. Die einzelnen Betriebsgeräte können bis zu 16 übergeordneten unterschiedlichen Gruppen zugeordnet werden, was die einheitliche Ansteuerung vieler Leuchten erleichtert.

Durch diese intelligenten Fähigkeiten wird es seltener als Insellösung, öfters als bevorzugtes System für die moderne Gebäudesystemtechnik eingesetzt. Es erlaubt komplexe Lichtszenen und z.B. den Einsatz für Tageslicht-abhängige Lichtsteuerungen. Die Steuer-Befehle erfordern eine 2-adrige Steuerleitung die verpolungssicher ist und ein Spannungsniveau von 16 V besitzt (max. 300m Länge bei 1,5mm-



Abbildung 7.38.: DALI-fähiger-LED-Konverter

Kabel). DALI-fähige Dimmer werden von der Leuchtenindustrie für die meisten höherwertigen Leuchten (gegen Aufpreis) zur Verfügung gestellt.

7.5.3.5. Digitales DMX-512-Protokoll

Das DMX-Steuerprotokoll (Digital Multiplex) ist prinzipiell unidirektional und arbeitet mit einer Datenübertragungsgeschwindigkeit von 250 kbit/s. Diese Schnelligkeit ist ideal für den Einsatz in der Show- und Veranstaltungs-Technik, wie z.B. für die schnelle Ansteuerung von Moving-Heads, Stroboskopen, Farbwechslern, Scannern und dergleichen. Neben der Steuerung von Helligkeit und Farbe werden dort über weitere Kanäle auch die Bewegungen der Leuchten (Pan- und Tilt-Ebene) so wie z.B. Zoom-Effekte über entsprechende Stellmotoren gesteuert. Das DMX-Signal ist ein digitales 8-Bit-Datenpaket (genauer 8 Datenbits plus 2 Stopp-Bits), das in einem System (dem sogenannten Universum) bis zu 512 verschiedene Kanäle in jeweils 256 Stufen ansteuern kann. Werden noch mehr Kanäle für ein größeres System benötigt, erfordert dies entsprechend weitere Universen mit entsprechend zusätzlichen physikalischen Übertragungswegen. Zum Dimmen kann die Helligkeit entsprechend von Stufe 1 bis 255 geändert werden. Die Daisy-Chain-Bus-Topologie erlaubt für ein Universum bis zu 32 Empfänger, die in Serie/Reihe miteinander verbunden sein können, ohne dass ein Repeater / Booster / Signalverstärker nötig wird. Die Signale werden für die Bühnentechnik in entsprechenden Lichtmischpulten bzw. per programmierten Computer-Applikation erzeugt.

Im LED-Bereich befindet sich die DMX-Steuerung für professionelle Anwendungen mit RGB-Farbwechsel im Einsatz. Sie ermöglicht entsprechend komplexere Lichtsequenzen mit vordefinierten oder frei programmierbaren Szenen. Professionelle

7. Betreiben und Ansteuern der LED

Systeme arbeiten auch mit unterschiedlichen Schnittstellen wie USB, Ethernet, WiFi etc.. bieten fest installierbare Controller mit WLAN-Netz und frei wählbaren mobilen Eingabegeräten wie Handy, Tablet oder fest installierten Bedienpanels an. Günstige Module für Privatanwender im Heimbereich bestehen oft aus einem Funk-DMX-Controller mit Fernbedienung und enthalten bereits verschiedene vordefinierte Farbwechsel-Sequenzen, die teilweise am PC noch erweitert werden können.



Abbildung 7.39.: Einfache DMX-Steuerung

7.5.3.6. Der KNX-Standard

Die Vision von Bill Gates, dass alle technischen Geräte im Haushalt kommunizieren können und individuell steuerbar sind, ist bereits seit längerem Realität, auch wenn die praktische Umsetzung doch recht aufwändig und vor allem teuer ist. Eine ähnliche Grundidee steckt hinter Systemen zur Gebäudeautomation, die seit längerem in großen Gebäuden und öffentlichen/staatlichen Gebäuden im Einsatz sind. Treibende Kraft sind hier Motive der Kontrolle und des Energiesparens. KNX ist der Name des aktuellen europäischen Standards für Gebäudesystemtechnik auf Feldbus-Basis als abwärtskompatibler Nachfolger des früheren EIB-Feldbus. Mittlerweile haben sich hunderte Hersteller der KNX-Association angegliedert und entwickeln ihre Geräte nach diesem international anerkannten, offenen Standard. Ein Vorteil daraus ist, dass wegen der einheitlichen Kompatibilität auch Geräte unterschiedlicher Hersteller in einem KNX-System eingesetzt werden können, zumindest theoretisch und solange sie entsprechend zertifiziert sind.

Die digitale Intelligenz, die hinter dieser Steuerung steht ist ähnlich der des DALI-

Prinzip: Energiesteuerung und Verhaltenssteuerung sind voneinander getrennt und die Kommunikation erfolgt bidirektional. Jedes Gerät kann unabhängig vom anderen programmiert und entsprechend über einen BUS (= digitales Übertragungssystem in Hochfrequenztechnik) angesteuert werden. So kann z.B. jeder Taster programmiert werden, welches Tastverhalten welche Aktionen auslöst. Mit Software-gestützter Programmierung via PC kann das KNX-System relativ einfach aufgesetzt, verändert bzw. überwacht werden. Alle Geräte können untereinander kommunizieren, so erkennt die KNX-Steuerung immer alle angeschlossenen Geräte, bzw. ihre Funktionalität und ihren aktuellen Betriebszustand. Das ermöglicht äußerst interaktives, komplexes Management von verschiedenen Subsystemen der Gebäudetechnik wie z.B. das Zusammenspiel von Heizungstechnik, Rollladen-, Licht-, Zutritts – und Lüftungssteuerung.

Für die Beleuchtungstechnik kann das in der Praxis z.B. bedeuten, dass je nach Tageslichteinfall gezielt künstliches Licht in der definierten Helligkeit zugeschaltet wird. Räume sind so auch für wechselnde Beleuchtungs-Anforderungen stets perfekt licht-technisch ansteuerbar, man denke an Veranstaltungen, Konferenzen, etc.. Fällt eine Leuchte aus, wird dies sofort vom System erkannt.

Die Signalübertragung erfolgt im Normalfall über eine Steuerleitung (Twisted Pair) ähnlich wie beim PC, alternativ über die 230V-Netz-Leitung, durch getaktete Signalübertragung. Alternativ kann der Übertragungsweg auch über Ethernet-Schnittstelle oder Funk gehen. Sensoren und Aktoren kommunizieren z.B. über die (Steuer-) Busleitung miteinander und da alle registrierten Teilnehmer eines KNX-Systems eine eigene physikalische Adresse besitzen, sind eindeutige Zuordnungen und die Bildung übergeordneter, unterschiedlicher Gruppen möglich. Die Geschwindigkeit der Signalübertragung beträgt 9,6kbit/s, was den Einsatz für sehr schnelle Lichtwechsel limitiert.

Zum Dimmen von LED-Beleuchtung wird oft DALI als Subsystem eingesetzt. Dazu benötigt man einen DALI-Aktor, der die Befehle des KNX-Systems auf die jeweilige DALI-Gruppe bzw. deren Steuergeräte überträgt. Da z.B. mit einem DALI-System 64 Dimmer unterschiedlich angesteuert werden können, kann die gesamte Leuchtenanzahl durch den Einsatz entsprechend vieler DALI-Aktoren / Subsysteme um ein Vielfaches multipliziert werden.

Das Dimmen mit KNX geht theoretisch auch ohne DALI-Protokoll mit primärseitigen und PWM-Dimmern. Dazu gibt es von den großen Haustechnik-Herstellern KNX-fähige Universaldimmer für die Hutschiene- und Verteilerdosenmontage, die direkt über ihre physikalische Adresse angesteuert werden.

7. Betreiben und Ansteuern der LED

Für den Beleuchtungsfachmann sind digitale Steuermöglichkeiten der Idealfall. Aber warum ist intelligentes Licht- und Gebäudemanagement im Privatbereich so wenig verbreitet?

Die Elektroindustrie drängt die zertifizierten Elektroinstallateure schon länger, ihre Kunden z.B. beim Hausbau zum Kauf eines Feldbus-Systems zu bewegen. Wegen der deftigen Preise für die jeweiligen Aktoren und den erhöhten Installationsaufwand erreichen die Investitionskosten aber schon für ein Einfamilienhaus schnell Höhen von 20 bis 40 Tausend Euro, für den Durchschnittsverdiener ein guter Grund, weiterhin konventionelle Verkabelung und unvernetzte Gerätesteuerungen zu bevorzugen. Die Hoffnung vieler, mit anderen Technologien eine ähnlich hohe Intelligenz zu wesentlich niedrigeren Kosten einzubringen wurde lange nicht erfüllt, erst seit kurzem gibt es eine schnell wachsende Zahl konkurrierender Systeme, die den Vorteil des besseren Preises jedoch mit Nachteilen wie Hersteller-Abhängigkeit und einer geringeren Anwendungsbreite bzw. Variabilität und Interkonnektivität mit anderen Systemen behaftet bleiben.

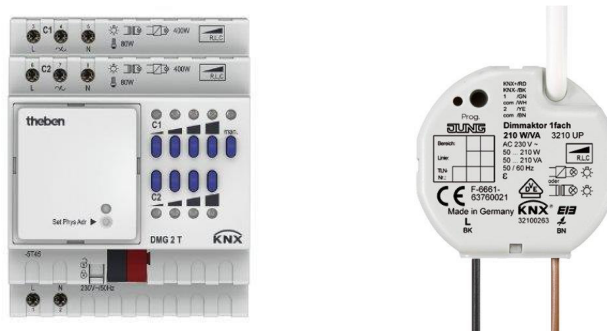


Abbildung 7.40.: KNX-Dimm-Aktoren für Hutschiene (li) und Dosen-Montage (re)

7.5.3.7. ZigBee und andere WiFi-Protokolle

Nachdem moderne Kommunikations- und Datenverarbeitungsgeräte wie TV, Handy oder Tablet-PC / portabler Mini-Computer über WiFi / Wireless LAN miteinander kommunizieren können, lag es nahe, auch die Gebäude- und Lichtsteuerung über diese drahtlose Technologien zu implementieren. ZigBee ist eine Antwort darauf, ein Industriestandard für ein Funknetzprotokoll, das vor allem im 2,4 GHz Frequenzband arbeitet. Es steht in direkter Konkurrenz zum ähnlichen, für den Heimgebrauch



Abbildung 7.41.: ZigBee-Aktor Fa. Philips

konzipierten Z-Wave Standard und ermöglicht die drahtlose Heim-Automatisierung und Gebäudesystemtechnik. Gerade in den USA werden in jüngster Zeit zahlreiche LED-Applikationen für den Privatgebrauch mit ZigBee-Steuerung angeboten, die über das Handy bzw. eine entsprechende App erfolgen kann.

Ähnlich wie bei allen Funksteuerungen ergeben sich aber grundlegende potentielle Problematiken wie die Störanfälligkeit durch andere funkende Geräte auf gleicher Frequenz, z.B. Bluetooth-Geräte, Funkfernsteuerungen, etc. und relativ lange Latenzzeiten, d.h. verzögerte Reaktion auf die eigentliche Befehlseingabe. Da gerade in massiven großen Gebäuden Radiowellen schnell an ihre Ausbreitungsgrenzen gelangen, hat sich die Wireless-Steuertechnik zumindest bei uns in Europa gegenüber der störsicheren Bus-Technologie im Bereich Haustechnik und Gebäudeautomatisierung/-Steuerung nicht durchgesetzt. Zu hoch ist das latente Ausfallrisiko und die Gefahr von ungewollter Fremdsteuerung. Für öffentliche Gebäude existieren Richtlinien, die einen Einsatz eigentlich ausschließen. Jeder von uns kennt den Ärger, wenn das WLAN zuhause ausfällt und die Internetverbindung verhindert. Für Beleuchtungszwecke sind solche Risiken, insbesondere in gewerblichen und öffentlichen Gebäuden viel zu hoch, deshalb werden sich diese Technologien in nächster Zeit wohl nur in begrenztem Umfang und vor allem im Heim-Bereich weiter etablieren.

7.5.3.8. Welches Protokoll für welche Aufgabe?

Die Frage entscheidet sich meist nach dem Budget, bzw. nach dem Aufwand im Verhältnis zu den Anforderungen. Aus technischer Sicht wird man zuerst die Leistungsfähigkeit des Steuersystems beurteilen. So können für die Entscheidung z.B. erforderliche Übertragungsgeschwindigkeiten der Steuersignale wichtig sein, oder

7. Betreiben und Ansteuern der LED

vorhandene bzw. potentielle Verkabelungsmöglichkeiten eine entscheidende Rolle einnehmen.

In der Praxis wird i.d.R. die Kosten-Nutzen-Analyse den Ausschlag geben, welches oder welche Kombination der relativ ausgereiften Systeme in welchem Umfang in Frage kommt.

7.6. Flackern/Flickern: Ursachen u. Maßnahmen

Jeder, der mit LEDs oder LED-Lampen arbeitet, kennt diesen Ärger: man glaubt bei der Installation alles richtig gemacht zu haben, aber die LED flackert, blinkt, oder geht gar nicht. Das kann prinzipiell diverse Ursachen haben und hängt natürlich zuerst davon ab, ob das Konzept aus Leitung, Schaltung, Vorschaltgerät und verbauter LED so funktionieren kann, bzw. die Teile richtig zueinanderpassen.

Wer bis hierher alles gelesen und verstanden hat, sollte durch sein besseres Verständnis für die elektrischen Vorgänge bei der Ansteuerung der LED weniger Probleme haben. Dennoch können auftretende Schwierigkeiten wie Flackern (engl. Flicker) nie ausgeschlossen werden, ohne die Konfiguration ausgiebig zu testen.

Bei Problemen sollte man systematisch nach dem Ausschlussprinzip auf Fehlersuche gehen, dann müßte die Ursache bald gefunden sein. Die meisten Schwierigkeiten treten dann auf, wenn nur ein Teil der Konfiguration aus Schalter/Dimmer/Vorschaltgerät eingesetzt bzw. ersetzt wird und nicht ein funktionierendes Gesamtsystem zum Einsatz kommt. Ist z.B. der Konverter an seiner oberen Leistungsgrenze, oder benötigt er eine bestimmte Mindestlast, sind Störungen die Folge. Wer im größeren Stil LED-Leuchten im Haus verbaut, sollte vorher am besten einen LED-Fachmann zu Rate ziehen, der aufgrund seiner Erfahrung einschätzen kann, wie man entsprechenden Problemen gleich aus dem Weg gehen kann, oder sie ggf. richtig löst. Manche LED-Produkte, wie z.B. viele LED-Leuchtmittel / Retrofits sind grundsätzlich anfällig für Flackern, warum das so ist, erkläre ich in den nächsten Kapiteln, wo wir uns gezielt verschiedene Lampentypen genauer anschauen.

Bei fabrikneuen LED-Leuchten, die direkt ans 230V Netz angeschlossen werden können, sollte Flackern prinzipiell eigentlich kein Thema sein, da ein seriöser Hersteller jede Leuchte so konzipiert, dass eine dauerhafte Funktionalität gewährleistet wird und auch jede einzelne Leuchte vor dem Warenausgang auf Funktionalität getestet. Für LED-Lampen gilt: Lesen Sie aber bitte vor dem Kauf die Herstellerangaben genau durch. Z.B. ein werbewirksames „dimmbar“ ganz vorne auf der

Verpackung kann sich im Kleingedruckten doch noch als „dimmbare mit XY“ oder „unter der Voraussetzung von Z“ herausstellen. Lassen Sie sich beim Kauf ausreichend beraten (geht nur im Fachhandel) oder stöbern Sie ggf. im Internet in Foren nach weiterführenden Informationen über das Betriebsverhalten, Problemen und funktionierende Konfigurationen.

Ein recht verflixtes, durchaus häufigeres Problem, das schon viele Elektriker zum Verzweifeln gebracht hat ist *Flackern oder Nachleuchten nach dem Ausschalten* bzw. das Phänomen: LED-Leuchten / -Lampen leuchten kurz nach oder blinken nach dem Ausschalten, bzw. ständig..

Die Ursache liegt meistens darin, dass aus irgendeinem Grund die auf Strom sehr empfindlich reagierende LED auch nach dem Ausschalten noch über einen unmerklichen Reststrom versorgt wird und entsprechend kurz oder lang (nach)leuchtet bzw. blinkt. LEDs sind eben sehr reaktionsschnell im Vergleich zu den trägen Glühlampen, welche geringe Restströme einfach wie ein Widerstand abbauen ohne überhaupt sichtbares Licht zu erzeugen. Das pulsierte Blinken entsteht dadurch, dass der geringe Reststrom den i.d.R. den vor der LED vorgeschalteten Kondensator auflädt, bis sich dieser dann zyklisch entlädt. Folgende Ursachen können dafür in Frage kommen:

- Die Kabelführung zur Leuchte ist derart, dass durch Induktion benachbarter Kabel eine geringe Menge Strom in die Zuleitung zur Leuchte induziert wird, die dafür ausreicht, dass die LED reagiert. Abhilfe: Separieren der Leitungen
- Die LED-Leuchte wird über einen (Wand)Schalter geschaltet, der eine Indikations-Glimmlampe verbaut hat. Abhilfe: Austausch gegen einen Kontrollschalter mit zusätzlicher N-Klemme, oder Glimmlampe entfernen
- Kriechstrom, Fehlerstrom, fehlerhafte oder minderwertige Bauteile oder Induktivitäten in der Leuchte selbst

Sollte bei den Ursachen 1) u. 2) keine einfache Abhilfe möglich sein, könnte man rein theoretisch (nur durch eine Fachkraft und unter Einhaltung aller Vorschriften) einen spannungsfesten Entstör-Kondensator parallel zur Leuchte schalten, oder auf diese Weise einen spannungsfesten, hochohmigen Widerstand (oder eine Glühwendellampe) einsetzen, um einen ähnlichen Effekt zu erreichen.

7.7. Summen und Pfeifen

Einige LED-Leuchtmittel und auch Vorschaltgeräte wie Controller oder Konverter geben in gedimmten Zustand, meist im untersten Bereich, ein unangenehm hochfrequenten Störgeräusch ab. Während die vor allem früher eingesetzten Mantelkerntrafos zum Tief-Ton-Brummen neigen, weil die Netzfrequenz die verbauten Me-

7. Betreiben und Ansteuern der LED

tallplatten zum Schwingen anregt, neigen Schaltnetzteile bei der Erzeugung von sehr hochfrequenten Strömen zum hochtonigen Summen bzw. Pfeifen. Abhilfe schafft bei Konvertern oft nur der Austausch gegen einen voll gekapseltes/vergossenes Schaltnetzteil (IP65). Bei Retrofits kann man nur wenig dagegen unternehmen, da der Wandler im Sockel des Leuchtmittels verbaut ist. Hier hilft nur der Austausch gegen solche, die nicht, oder kaum wahrnehmbar summen.

Wer LED-Leuchten mit einer Leistungsaufnahme von weniger als 75W betreibt, oder andere, deren Vorschaltgeräte aus anderen Gründen keine Power-Factor-Correction betreiben, wird z.B. bei der Benutzung eines im selben Stromkreis liegenden Unterputz-Radios ein Problem haben: Das Radiogerät, das direkt in die Wand-schalterdosen eingebaut ist, wird in vielen Fällen die Oberschwingungseffekte der Schaltelektronik als störendes Rauschen im Radiobetrieb wiedergeben, da diese sich über die Verkabelung ins gesamte Stromnetz ausbreiten. Für Unterputz-Radios sind also nur LED-Leuchten und -Lampen mit hoher technischer Güte geeignet.

Kapitel 8

LED-Lampen und -Leuchten

8.1. LED-Produkt-Qualität

Wie lange sollte ein Produkt halten? Ist die Industrie überhaupt daran interessiert, nur alle 20 Jahre eine neue Leuchte an den Mann zu bringen? Gerüchte im Bereich der Unterhaltungselektronik, dass z.B. TV-Geräte absichtlich schon mit einem die Lebenszeit begrenzenden Bug produziert werden, kann man glauben, oder nicht und sich vielleicht einfach damit abfinden, dass der Fehler-teufel dank hoher Komplexität automatisch im Produkt steckt...

8.1.1. Technik versus Preis und Anspruch

Wie man bis hierher lesen konnte, gibt es viele Notwendigkeiten für ein ausgeklügeltes, technisches LED-Design und durchaus unterschiedliche Konzepte auf dem Weg dahin. Neben den Kriterien Heat-Management-Design und Optik-Design ist für die Qualität einer LED-Leuchte vor allem das elektronische Design wichtig. Fällt die LED aus, liegt es selten an der LED selbst, sondern häufig an ausgefallener Leistungselektronik.

Die Wahl des passenden elektronischen Konzepts für eine Leuchte richtet sich nach den spezifischen Anforderungen für die jeweilige Anwendung und ohne Zweifel auch nach den Produktionskosten. Die Maxime heißt entsprechend oft, das günstigste Konzept auszuwählen, das für die Aufgabenstellung noch gut geeignet ist, um ein Produkt zu erzeugen, das eine Reklamation-freie mittlere Langlebigkeit erreicht. Der Handel als erster Betroffener eines Schadens-/Gewährleistungsfalls wird immer direkt beim Hersteller Regress nehmen, soweit das in der Praxis möglich ist. Dieser wird prüfen, ob eine sachgemäße Benutzung erfolgt ist, ob er ggf. bei sich den Fehler suchen muss, oder wiederum auf seine Zulieferer zurückgreifen kann. Hersteller elektronischer Bauelemente wie Widerstände, Dioden, Konden-

8. LED-Lampen und -Leuchten

satoren, Spulen, Drosseln, etc. sind meist so groß, dass ihre Produkte in Massen hergestellt werden. Wenn sie mangelhafte Produkte verkaufen, gehen sie große Risiken auf enorme Schadensersatzsummen ein, da der Regressanspruch ein Vielfaches des Verkaufspreises ist. Deshalb versuchen sie mittels eines umfassenden Qualitätsmanagements sicherzustellen, dass fehlerhafte Bauteile äußerst selten auf den Markt kommen. Die Konzeption/Verschaltung mehrerer solcher Bauteile aus unterschiedlicher Herkunft zu Baugruppen vergrößert die Gefahr von Fehlerquellen signifikant, selbst wenn alle Teile an sich fehlerfrei sind. Mangelhaftes elektronisches Design, z.B. durch Inkompatibilität der Bauelemente, oder falscher Dimensionierung, macht sich langfristig im Betriebsverhalten bemerkbar, z.B. durch Überhitzung, Flackern, Summen, etc., bevor der verfrühte Totalausfall auftritt. Viele Leuchtenhersteller verbauen daher oft komplette Systeme ihrer Zulieferer, die sich so schon entsprechend bewährt haben.

Die Produkte traditioneller Beleuchtungshersteller sollten bezüglich der Qualität eigentlich unbedenklich sein, denn inzwischen hat sich erstens fast überall entsprechendes Know-how für den LED-Betrieb angereichert und zweitens haben die Hersteller entsprechend Prozesse im Qualitätsmanagement etabliert, die verhindern müssten, dass ein fehlerhaftes Design in den Handel gelangt, auch wenn die eigentliche Produktion weit entfernt in Asien sitzt. Wer z.B. in China in großem Stil produzieren lässt, wird bereits vor Ort geeignete Maßnahmen zur Qualitätssicherung treffen (müssen), z.B. mit eigenen Mitarbeitern dort. Die europäischen Qualitätsnormen und Gewährleistungsgesetze tun ihr übriges dazu, die Ansprüche auf der Käuferseite hoch zu halten. Kleine Hersteller von Massengütern können die zusätzlichen Fixkosten, die aus dem Qualitätsmanagement resultieren, für entsprechend kleine Produktionsmengen normalerweise nicht schultern. Entsprechend kommt es auf die Erfahrung und technische Ausstattung der Hersteller an. LED-Leuchten für den Massenmarkt werden heute vor allem da produziert, wo die Bauteile und Produktionskosten günstig sind, d.h. in Asien. In Asien sind auch die Hersteller der elektronischen Komponenten und der günstigen LEDs beheimatet, speziell in China.

Wir Europäer als Käufer der Leuchten sind an dieser Konfiguration nicht unbeteiligt, da wir anscheinend nicht bereit sind, die relativ höheren Produktionskosten für Leuchten in Europa zu bezahlen. Länder wie z.B. Italien, Deutschland, Dänemark und Schweden, die eine lange Tradition in der Leuchtenherstellung haben bedienen nur noch den hochpreisigen Sektor bzw. professionellen Sektor, wo es um Intelligenz und Langlebigkeit der Leuchte geht.

8.1.2. Das Phänomen Shenzhen

In Shenzhen, einer Mega-City mit riesigem Industriebezirk in der chinesischen Provinz Guangdong existieren mittlerweile viele hunderte Firmen für LED-Beleuchtung. Shenzhen ist eine sogenannte Sonderwirtschaftszone, geografisch nahe zu Hong Kong und erwirtschaftet aktuell das höchste chinesische Pro-Kopf-Einkommen mit Hoch-Technologie-Produkten wie eben die LED eines ist. Ein Bild für die Dimensionen der Güterproduktion: Der Hafen von Shenzhen schlägt wie auch der benachbarte Hong Kong Hafen drei mal soviel Güter um wie Rotterdam, der größte Güterhafen in Europa. Die genaue Zahl der LED-Chip-Hersteller ist wie die der LED-Leuchten-Hersteller unbekannt und wohl nicht zu ermitteln. Aufgrund der Überproduktion chinesischer LED-Fabriken sind die LED-Preise in China selbst relativ weit gesunken. Die hat wohl die Zunahme der kleinen Leuchtenhersteller weiter beschleunigt, weil die wichtigste und teuerste Ressource, der LED-Chip selbst, relativ günstiger als früher zu haben ist. Irgendwie erinnert das an die Entwicklung im PC-Boom mit seinen Rechenchips.

Viele sehr kleine Firmen treten gegenüber ihren ausländischen B2B-Kunden seit Beginn an irreführend als veritabler Hersteller auf, um ein entsprechend verkaufsförderndes Vertrauen über die räumliche Distanz hin zu erzeugen. In Wirklichkeit handelt es sich oft um reine Händler, die auf der großen LED-Welle mitreiten. Auf ihren Websites finden sich dann die seltsam gleich lautenden Aussagen und sehr häufig fast identischen Bilder von großen Produktionsanlagen und Entwicklungsabteilungen in uniformen Gewerbekomplexen. Dieses befremdlich unlautere Gebaren und die oft schlechte Qualität vieler LED-Produkte auch von durchaus echten, kleinen chinesischen Herstellern hatten gerade zu Beginn des LED-Booms für viele negative Schlagzeilen bei LED-Leuchten gesorgt. Der Kunde hierzulande tendierte lange dazu, nach den ersten sehr schlechten Erfahrungen mit diesen Produkten, die LED an sich prinzipiell mit Billig-Technologie gleichzusetzen. Die Gründe für diesen verpatzten Start der LED haben vielleicht nicht immer in böser Absicht und oder überbordender Gier gelegen. Vielmehr haben zu Beginn der Ära wohl sehr viele Unternehmer in China, aus ihrer ökonomischen Unerfahrenheit heraus und aufgrund fehlendem technischen Know-how und Mangels genügend Unternehmens-Kapitals und Cash-flows, die Herausforderungen auf technischer und ökonomischer Seite einfach unterschätzt und sind viel zu unbedarft und risikofreudig an die Produktion einer komplexen Technik herangegangen, einfach um beim LED-Goldrausch doch mit dabei zu sein.

Ich treibe es zur Anschaulichkeit - natürlich völlig frei erfunden - und sehr sarkastisch auf die Spitze: Man male sich bildlich aus, was passiert, wenn ein chinesischer

8. LED-Lampen und -Leuchten

Hersteller, der bisher Kinder-Spielzeug kopiert und gefertigt hat, wegen steigender Import-Restriktionen aus Sicherheitsgründen in Europa und wegen der erhofften weit größeren Gewinnmargen, nun die LED-Produkte seines lokalen Nachbarbetriebs kopiert, der wiederum die LED-Produkte eines großen chinesischen Mitbewerbers kopiert, der wiederum die Produkte eines taiwanesischen Herstellers kopiert, die wiederum den LED-Produkten eines japanischen Herstellers verblüffend ähnlich sind... .

Ein weiterer Faktor für diese Entwicklung liegt natürlich auch darin begründet, dass die Sanktionsmacht der betroffenen ausländischen B2B-Kunden hinsichtlich Regress-Ansprüchen gegen die chinesischen Lieferanten und Hersteller gegen Null geht. Kein Europäer macht sich Hoffnungen auf eine erfolgreiche Schadensersatzklage gegen ein kleines chinesisches Unternehmen. Niemand will noch mehr Geld verlieren und einen weiteren Fehler begehen.

Viele kleine Leuchten-Händler in Europa sind zunächst mit ähnlich großer Naivität an den Verkauf dieser mit heißer Nadel gestrickten LED-Produkte gegangen, ohne zu wissen, worauf sie sich da eigentlich einlassen. Das wiederum liegt zum Ersten darin begründet, dass das nötige technische Know-how für LEDs im traditionellen Leuchtenhandel einfach Mangels Notwendigkeit vielfach (noch) gar nicht vorhanden war und die kleinen europäischen Leuchten-Händler sich deshalb zu unbedarft auf Produkte mit überhöhten Versprechungen einließen. Zum Zweiten sind auch hier in Deutschland viele Branchen-unerfahrene auf den verheißungsvollen Zug namens LED aufgesprungen, ohne sich mit den Fallstricken der Branche auseinanderzusetzen. Die große Erwartung, sehr schnell ordentliche Margen in einem Markt mit rasanten Zuwächsen zu machen, hat auch hier so manchen die Sorgfaltspflicht vergessen lassen. Viele dieser modernen Goldsucher haben sehr wahrscheinlich inzwischen ihr Lehrgeld schon teuer bezahlt. Doch auch heute noch kann jedermann im Internet, und auch bei großen veritablen Online-Handelskonzernen, LED-Lampen und Leuchten erwerben, die von zweifelhafter Güte und unbekannter Herkunft sind, aber mit unschlagbar günstigem Preis zum Kauf locken. All diesen Anbietern muss ich inzwischen jedoch statt grober Fahrlässigkeit nun eher Billigung oder betrügerische Absicht unterstellen, da sie sicher schon jede Menge einschlägige Reklamationen bekommen haben sollten. Das Engagement der Baumarktketten ins China-Geschäft hat auch zu einem enormen Preiskampf im unteren Segment des Beleuchtungsmarktes geführt, den mittlerweile auch die zahlreichen kleinen (Webshop-) Händler mit günstigen bzw. minderwertigen LED-Produkten immer mehr zu spüren bekommen. Die ursprünglich hohen Margen, die eine resultierende hohe Reklamationsquote finanziell abfedern konnten, sind sicher nicht mehr zu halten, das Geschäftsmodell hat sich daher im legalen Bereich ins Aus manövriert.

8.1. LED-Produkt-Qualität

Chinesen verkaufen i.d.R. an alle, die sich kaufwillig und solvent zeigen, Umsatz schlägt Kundenschutz und Skrupel. Was kann konkret beim unbesehenen LED-Leuchten-Order in Shenzhen alles richtig schief laufen? Da gäbe es aus eigener Berufserfahrung in diesem Bereich sehr viel zu berichten... z.B. dass ordentlich konzipierte Leuchten in großer Zahl dennoch defekt angeliefert wurden, was vermuten lässt, dass in der Produktion entgegen der Versprechungen gar kein Funktions-Test und somit nie irgendeine Qualitätskontrolle stattgefunden hat, trotz angeblicher ISO-Zertifizierung. Andere Leuchten hatten nicht die versprochenen Produkteigenschaften oder unangekündigte Design- und Bauteile-Änderungen mit schweren konstruktiven Fehlern, die einen vermuten lassen, dass die Leuchte eben doch nur eine schlechte Kopie eines Mitbewerberproduktes ist, bei dem der Kopierende gar nicht verstanden hat, worauf es technisch überhaupt ankommt.

Viele der wirklich haarsträubenden Details und Stories über Qualitätsprobleme bezüglich China-Import-Waren sind oft gerade deshalb so skurril, weil es recht häufig zu schweren Kommunikations-Problemen kommt. Es fängt damit an, dass die Verkaufsperson in vielen Fällen weder über ausreichende technische Kenntnis der eignen Produkte, noch über ausreichendes Englisch, geschweige denn über eine ausreichende Entscheidungskompetenz verfügt, um verbindliche Zusagen zu leisten. Daher kommt es oft von Beginn an zu fatalen Missverständnissen mit falschen Versprechungen. Die Verkaufsperson ist in aller Regel weiblich und hat sich verkaufsfördernd einen amerikanischen oder europäischen Vornamen zugelegt, den der Europäer oder Amerikaner im Gegensatz zum eigentlichen chinesischen aussprechen und sich merken kann. Das soll sicher auch Nähe schaffen. So existieren zahlreiche Maggies, Lisas, Lindas, Cindys, die sich für uns Langnasen einen familiär klingenden Vornamen und hochtrabenden Titel zugelegt haben. Die 24-Stunden-Online-Verfügbarkeit dieser Exportmanager lässt genauso wie doppelte Antworten zu Anfragen vermuten, dass hinter der adretten Maggie, wie sie auf dem geposteten Foto dargestellt wird, ein x-beliebiger Mitarbeiter steht, der potentiell Kaufinteresse abfangen soll.

In vielen Fällen versuchen die anscheinend unter riesigem Verkaufsdruck stehenden Verkäufer/Innen, alle auftretenden Probleme, für die sie ad hoc keine ihnen bekannte Standard-Lösung parat haben, fatalerweise einfach auszublenken, da sie entsprechend negative Konsequenzen für ihren Job befürchten. Dies macht sich in nicht eingehaltenen Versprechen, oder Abreden hinsichtlich Bestellbedingungen, Lieferzeiten, etc. bemerkbar. Der kulturelle Unterschied im Umgang mit und der Benennung von Problemen ist offensichtlich. Wir Deutschen sind es gewohnt Probleme ohne Beschönigungen und Umschweife sofort direkt anzusprechen, das Gegenüber

8. LED-Lampen und -Leuchten

wird damit regelmäßig leicht bis schwer überfordert.

Eine weitere Problematik liegt in der Unstetigkeit chinesischer LED-Produktlinien begründet. Chinesische Anbieter wechseln anscheinend schnell das Sortiment oder ihre Zulieferer, wenn die Verkaufszahlen nicht stimmen oder der Preis im Einkauf steigt. Kauft z.B. ein kleiner Leuchten-Hersteller aus Shenzhen die LEDs nur nach dem günstigsten Tages-Preis ein und nur in den Mengen für die aktuell benötigte Produktionsmenge, kann er für spätere Produktions-Generationen seiner Leuchte, bei der er dann zwangsläufig wieder andere Chips einsetzen muss, keine identische Lichtfarbe oder Leistung gewähren. Dies ist ein Umstand, mit dem man den Endkunden in Fällen von Austausch oder Nachkauf hierzulande garantiert nie zufriedenstellen kann und der eigentlich nicht ignoriert werden kann.

Hochwertige Produkte oder Bauteile werden daher von europäischen Herstellern für den Ersatzbedarf in der Zukunft für eine bestimmte Zeitspanne vorgehalten. Dieser Fakt schlägt sich naturgemäß dann im Endpreis für den Endkunden nieder. Hochwertige Produkte größerer Stückzahl werden auch mit einem hohen Grad an moderner maschineller Bearbeitung gefertigt, um eine konstante Qualität zu erzielen. Billigste Produkte werden, so paradox das für unser Verständnis klingt, von ungelernten (Wander-)Arbeitern, großteils händisch, aus zusammengekauften Einzelteilen zusammengebaut, weil das für kleine Mengen dort noch wesentlich günstiger als die Maschinenfertigung ist. Die Produktqualität variiert dann entsprechend gewaltig und ist insgesamt gesehen dann definitiv ungenügend.

Kleine Chinesische Hersteller z.B. produzieren sehr häufig „on demand“, d.h. immer nur exakt die Stückzahlen des Produktes, das aktuell bestellt und schon vorab bezahlt wurde. Die Hersteller haben keine finanziellen Mittel für größere Investitionen in Maschinen und Fertigungskapazitäten und wollen auch kein größeres Risiko eingehen, auf Halde zu produzieren. Unter dem regelmäßig auftretenden Zeitdruck in der Just-In-Time-Produktion fällt da schon mal der Funktionstest flach, und das Qualitätsmanagement bleibt eine falsche Beteuerung. So mancher deutscher Händler, der den vielversprechenden Bildern über moderne Produktionsanlagen und ins Internet gestellten Urkunden von ISO 9000-Qualitätszertifizierungen geglaubt hat, kam irgendwann darauf, dass es sich nur um die Vortäuschung falscher Tatsachen handele. Deutsche Prüfinstitute wie VDE oder TÜV listen auf ihren Webseiten ganz konkret unzählige Fälle auf, wo asiatische Hersteller ungefragt das Vertrauen erweckende und daher verkaufsfördernde Logo missbrauchen. Die Frage ist, wer schaut diese Warnungen an?

Das soll jetzt aber bitte nicht heißen, dass alle Produkte aus Shenzhen, Guangdong,

China mangelhaft sind, bzw. es alle Hersteller dort nicht so genau mit der Wahrheit nehmen. Auch dort gibt es sehr gute Hersteller, die mit entsprechendem Know-how und Aufwand zuverlässige Produkte herstellen. Mit der steigenden Auftragsfertigung für westliche Hersteller etabliert sich zudem Know-how zu Technologie und Prozessen. Von hier aus bei den chinesischen Herstellern diesbezüglich die Spreu vom Weizen zu trennen, gestaltet sich aber als mehr als schwierig und so bleibt das ad-hoc China-Geschäft mit kleineren LED-Unternehmen weiter sehr risikobehaftet.

8.1.3. CE-Konformität

Alle Produkte, die in Europa auf den Markt kommen, müssen den jeweiligen Richtlinien für die Produktsicherheit entsprechen. Der Hersteller, oder Importeur, letztendlich derjenige, der sie in der EU in den Handel bringt, muss diese Konformität mit europäischen Normen prüfen und dafür garantieren. Dazu hat jedes Produkt, für den Kunden leicht sichtbar, das normierte CE-Prüfzeichen als sichtbares Zeichen dieser erfolgreichen Konformitätsprüfung zu tragen. Eigentlich erfordert dieses Vorgehen eine genaue Dokumentation definierter Produktionsprozesse und Funktionstests und eine penible Aufzeichnung der Prüfwerte hinsichtlich der erfolgreichen Einhaltung einschlägiger Norm-Grenzwerte für die Produktsicherheit. Die Prüfbehörden der EU-Länder sind berechtigt, diese Nachweise von jedem bei Bedarf zur Prüfung anzufordern.

In der Realität passiert das aber anscheinend so selten, dass die Verlockung wohl immer noch groß ist, dass Hersteller sich diese Arbeit komplett ersparen und das CE-Zeichen einfach, als für den Verkauf notwendiges „Muss“, unberechtigt aufdrucken. Das Vertrauen in die Aussagekraft des CE-Zeichens ist aus schlechter Erfahrung heraus entsprechend gesunken. CE steht für "Chinese-Export" heißt der zugehörige Wortwitz in einschlägigen Kreisen...

Viele Großkunden oder Kunden aus dem Öffentlichen Bereich fordern deshalb bei Ausschreibungen oder großen Aufträgen zusätzlich zum CE-Zeichen entsprechende vertrauenswürdige Zertifikate von Prüforganisationen wie TÜV, UL, etc..

8.1.4. Prüfsiegel von Prüforganisationen

Der Leuchten-Hersteller in Europa hat im Gegensatz zu früheren Jahren die Freiheit, die Konformität hinsichtlich relevanter Sicherheitsbestimmungen entweder selbst zu prüfen, oder diese Prüfung weiterhin einer Prüfinstitution, wie z.B. dem VDE oder TÜV zu übertragen. Eine Prüfung, z.B. hinsichtlich elektromagnetischer Verträglichkeit, ist aber ohne professionelles Equipment und genaue Kenntnis der

8. LED-Lampen und -Leuchten

einschlägigen Vorschriften gar nicht möglich.

Da die Prüfinstitutionen penibel genau arbeiten und ihre somit anfallenden hohen Lohnkosten für die Prüf-Ingenieure umlegen müssen, fallen die Honorare stets entsprechend hoch aus. Eine elektrische und elektromagnetische Konformitätsprüfung für ein bestimmtes Beleuchtungs-Produkt kostet leicht zehntausend Euro und mehr und gilt i.d.R. nur für die zu prüfende Konfiguration. Wegen des unsicheren Verkaufserfolgs und der schnellen Produktzyklen im LED-Bereich verzichten aus Kostengründen daher insbesondere kleinere Hersteller auf diese eigentlich für den Verkauf sehr förderlichen Prüfsiegel.

Wo liegen eigentlich die größten Gefahrenquellen bei einer Leuchte? Sie kann zu heiß werden, was sich bis zur Brandgefahr ausweiten könnte, oder unter Strom stehen. Sollte das Thermo-Design der LED-Leuchte so schlecht ausgefallen sein, dass tatsächlich eine Hitze von 300° C entsteht, ab dieser Temperatur brennt z.B. Holz, wäre der LED-Chip schon lange vorher ausgefallen, da die maximale Sperrschichttemperatur schon viel früher zu einem Ausfall der Leuchte geführt hätte. Weil die meisten LED-Leuchten mit Schutzkleinspannung betrieben werden, ist besonders der Teil der elektrischen Ansteuerung bis zum Schaltnetzteil potentiell gefährlich und entsprechend von Interesse. Hier ist tatsächlich eine sehr gute Qualität mit Sicherheitsmerkmalen wie Selbstabschaltung bei Überhitzung und Überstrom etc. sehr wichtig. Auch ich bevorzuge Geräte mit Prüfzeichen, da ich der Meinung bin, dass bei diesen hohen Produktionsmengen vom Hersteller durchaus erwartet werden kann, dass er in ein Prüfinstitut investiert. Findet sich entsprechend ein glaubwürdiges UL / TÜV / ENEC - Zeichen auf dem Vorschaltgerät, spricht das daher für Sicherheit. Bei der Verwendung von LED-Tubes und LED GU10-Spots, wo der Konverter unmittelbar in der Lampe selbst sitzt, ist ein TÜV-Siegel auch beruhigend, falls nicht wenigstens ein sehr bekannter Leuchtmittel-Markennamen draufsteht.

8.1.5. Weitere Produkterfordernisse

EU-Energie-Pass:

Andere EU-Bestrebungen zum Verbraucherschutz, wie z.B. die Ausweisung mit Energiespar-Labels, gehen aber im Fall der LED völlig an der Realität vorbei und erweisen sich als fehlgeleitete Bürokratie-Monster mit zweifelhaftem Nutzen für den Endkunden. Mit dem inzwischen vorgeschriebenen Energie-Label für

8.1. LED-Produkt-Qualität

LED-Leuchtmittel, die sowieso alle in Energie sparende Kategorien fallen, ist dem Endverbraucher nicht zweckdienlich geholfen, da er aus diesem Label weder eine Einschätzung der Qualität vornehmen, noch eine Verhaltensempfehlung ableiten kann. Davon profitieren allerhöchstens zwielichtige Abmahn-Rechtsanwälte die nach fehlenden Labels suchen und höchstens die Label-Drucker selbst.

Bedienungsanleitung:

Es geht nichts über eine gute, weil anschauliche und auch sofort verständliche Bedienungsanleitung! Immer vorausgesetzt, dass sie auch vom Kunden bzw. Monteur gelesen wird. Regelmäßig erhalte ich telefonische Nachfragen von Elektroinstallateuren, die gerne gewusst hätten, wie die bestimmte Leuchte anzuschließen ist. Die Bedienungsanleitung mit dem Schaltbild haben sie wie immer gleich beim Auspacken, zusammen mit der Umverpackung (und zusammen mit Befestigungsteilen/-schrauben, Einbauringen, etc.), ungelesen weggeworfen...

Der Gesetzgeber schreibt, zumindest für die Rechte des privaten Endkunden, eine ausreichend verständliche Bedienungsanleitung vor. Fehlt diese, oder ist sie unverständlich oder unvollständig, stellt dies einen erheblichen Produktmangel dar, der wie alle anderen auch zu beseitigen ist und falls das nicht erfolgt, zur Rückabwicklung des Kaufs führen kann. Das hat sich anscheinend noch nicht überall herumgesprochen...

Was bis heute fast völlig fehlt, ist die deutlich sichtbare Angabe für den Endverbraucher über die Güte des LED-Binnings, die in Form der SDCM-Kennzahl einen Hinweis auf die Farbtreue der eingesetzten LEDs liefert. Bei Billigware unterscheiden sich unterschiedliche Leuchten oder Lampen gleichen Typs häufig deutlich sichtbar in der Lichtfarbe. Wahrscheinlich würde aber eine entsprechende Kennzeichnung den privaten Kunden eher noch weiter überfordern...

Steht in der Bedienungsanleitung, dass das Produkt nur von einem Fachmann installiert werden darf, ist dieser Hinweis auch ernst zu nehmen, da man ansonsten die Gewährleistung verlieren kann. Produkt-spezifische Erfordernisse, die auf den jeweiligen Einsatz der Leuchte bezogen sind, können oft nur von Fachleuchten beurteilt werden, z.B. allgemeine Eigenschaften wie ausreichender Lichtstrom, Abstrahlwinkel, Blendfreiheit, Funkentstörung, usw..

Um auf die unterschiedlichen Eigenheiten verschiedener Lampen- bzw. Leuchtentypen näher eingehen zu können, werden im Folgenden die gängigsten Typen genauer betrachtet.

8. LED-Lampen und -Leuchten

8.2. Retrofits nach Lichtcharakteristik u. Sockeltyp

LED-Leuchtmittel finden sich inzwischen, wie ihre Vorgänger die Glühbirnen, fast in jedem Supermarkt und sind von der Leistungsfähigkeit geeignet, fast alle Beleuchtungs-Aufgaben zu erfüllen. Die Preise sind ordentlich gesunken, nicht zuletzt deshalb, weil die großen Leuchtmittelhersteller mit Kampfpreisen versuchen, frühzeitig Marktanteile zu sichern, man nennt das Kundenbindung. Der Kaufpreis kann aber trügerisch sein. Ein Beispiel: Wer um Geld zu sparen seiner geliebten Esszimmerleuchte mit 75W-Glühbirne eine 12W-LED-Retrofit für 13,90€ spendiert und feststellen muss, dass aber er noch einen neuen Dimmereinsatz für 104,90 € braucht, wird enttäuscht sein, dass sich die Amortisationszeit seiner LED-Investition schnell mal unerwartet vervielfacht hat, sich so schnell gar nicht rechnet.

Das Marketing der Hersteller verspricht gerne eine problemlose Handhabung und übertreibt damit nicht selten. Ein Retrofit/LED-Leuchtmittel hat im Sockelgehäuse Vorschalt elektronik verbaut, die ähnliche Aufgaben wie ein Schaltnetzteil zu leisten hat. Da aber alles auf engstem Raum Platz finden muss und die Elektronik möglichst wenig kosten soll, kann man sich vorstellen, dass es fast unmöglich ist, eine ähnlich gute Ansteuerung wie mit einem guten Konverter zu erreichen.

Besonders das Dimmen auf der Primärseite ist bei Retrofits eine Herausforderung. Bei 230V-Retrofits genügt es leider nicht, einen Phasenabschnitt-Dimmer zu verwenden, auch kann der Einsatz eines speziellen LED-Dimmers den sorgenfreien Betrieb keineswegs garantieren. Oft bleibt der dimmbare Bereich relativ eingeschränkt und zu oft kommt es zu unerwünschtem Flackern beim Dimmen. In anderen Fällen ist das Design der Lampe nicht für den universellen Einsatz in Leuchten geeignet. Abmessungen und Abstrahlcharakteristik variieren erheblich, im Gegensatz zur standardisierten Glühbirne oder zum Halogenspot. Informieren und Ausprobieren heißt die Maxime hier.

Im folgenden habe ich LED-Leuchtmittel nach der äußeren Form und nach Sockeltyp gruppiert. Genauso gut hätte ich natürlich auch eine reine Einteilung nach Ansteuerung, Sockeltypen, Abstrahlcharakteristik oder einer anderen Gemeinsamkeit vornehmen können, die sich aber alle überschneiden. Die vielen verschiedenen Sockeltypen der konventionellen Lampen sind für deren Einsatz optimiert worden und finden sich entsprechend der Kundennachfrage auch im LED-Retrofit-Bereich wieder.

Gerade asiatische Hersteller scheinen sehr ehrgeizig zu sein, jeden erdenklichen Lampentyp durch LEDs zu ersetzen, um Absatzmöglichkeiten zu generieren. Teilweise erzeugt das interessante, aber meist praxis-untaugliche Kreationen... Zu Anfang

8.2. Retrofits nach Lichtcharakteristik u. Sockeltyp

des Buchs habe ich schon angesprochen, dass die Retrofits das sichtbare Zeichen des technologischen Übergangs von Glühfaden- zu LED-Technologie sind und wohl nur begrenzte Zeit eine Rolle spielen werden. Noch befinden wir uns aber in einem Stadium, wo das LED-Leuchtmittel eher das sichtbarste Zeichen der neuen Beleuchtungstechnologie ist.

8.2.1. LED-Birnen (Bulbs) E27/E14

Die gewöhnliche Haushaltsglühbirne mit ihrem E27-Schraubgewinde ist das wohl meist benutzte Leuchtmittel im Privatbereich. Das E steht für Thomas Edison und 27 für den Gewinde-Außendurchmesser in Millimeter. Mit den Verkaufsverböten in EU und China ist der LED-Retrofitabsatz erst richtig in Schwung gekommen, auch wenn die Leistungsfähigkeit der ersten Exemplare noch lange nicht der einer 75W oder gar 100W-Birne entsprach.



Abbildung 8.1.: Konventionelle LED-Bulb mit Heatsink und E27-Fassung

8.2.1.1. Problem Lampengeometrie

Das Hauptproblem bei diesem Glühbirnen-Typ ist die veränderte Abstrahl-Geometrie. Ein leistungsstarker LED-Chip muss unmittelbar auf einem entsprechend groß dimensionierten Heatsink sitzen. Da der Chip nur halbkugelförmig abstrahlt, „fehlt“ die Hälfte des ursprünglichen Leuchtkörpers der Glühbirne, was eine Abstrahlung auf die Seite und nach hinten nicht zulässt. Sehr viele ältere Leuchten sind aber auf die ursprüngliche rundum Strahlungsrichtung ausgelegt, deshalb ergeben sich mit Retrofits oft unerwünschte Schatten in den unbeleuchteten Bereichen des Lampenschirms. Jeder der sich eine Retrofit kauft, sollte unbedingt vorher auf die Abmessungen achten, da einige breiter und/oder länger sind als die ursprüngliche Standardgröße, was beim Einbau zu Schwierigkeiten und unerwünschten Effekten führen kann. Einige Hersteller haben die Heatsink- und Leuchtgeometrie-Dilemmata

8. LED-Lampen und -Leuchten

mit originellem Design gelöst.. andere setzen Licht-leitende und -verteilende Strukturen in der Bulb ein oder setzen auf die sich rasch verbreitende Filament-Technik.



Abbildung 8.2.: LED-Bulbs mit avantgardistischem Design

In jüngster Zeit sind immer mehr Retrofits mit relativ glatter Keramikfassung am Markt. Keramik leitet zwar Wärme ganz gut, kann aber keinen Alu-Heatsink mit dessen vergrößerter Oberfläche ersetzen. In einigen Fällen wird statt der Keramik auch einfach Kunststoff in ähnlicher Optik und Haptik verwendet, ein Minus bei der Wärmeableitung, das dann eine entsprechend geringe Sperrschichttemperatur der LEDs im Betrieb erfordert.. Einige Ansätze der Hersteller, die Abstrahlcharakteristik zu verbessern erscheinen, was das Heat-Management anbelangt, noch sehr unausgegrenzt.

Inzwischen drückt der Preiskampf bei Retrofits zu Gunsten der Endverbraucher die Preise, aktuell gibt es bereits für 3 bis 10 € Produkte für die E27-Fassung am Markt. Da sie um den Faktor 5 effizienter mit dem Strom umgehen, als es die Glühbirne tat, können sie sich entsprechend relativ bald amortisieren. Wer sich nicht sicher ist, ob die angegebene Lichtfarbe für ihn passt, kommt nicht umher, dies vorher ausprobieren. Die gleiche Kelvin-Zahl bedeutet gerade im Warmton-Bereich nicht, dass die Farbe auch wirklich identisch ist. Je nach verwendetem Phosphor und Ansteuerung kann das Licht schon mal einen (leichten) Gelb-, Rot oder Grünstich haben, der sich am Besten im direkten Vergleich zeigt und individuell unterschiedlich Akzeptanz beim Kunden findet, oder auch nicht. Philips hat als einer der Ersten die 2-Farben Technologie auch für Leuchtmittel eingesetzt, beim Dimmen wird dann

8.2. Retrofits nach Lichtcharakteristik u. Sockeltyp



Abbildung 8.3.: li LED-Glühfadenimitat, LED-Bulbs ohne Kühlkörper

der Farbton wärmer, wie man es von der Glühfadentechnologie her gewohnt ist.



Abbildung 8.4.: E14-Retrofits mit diversen Light-beam-Designs

Da Retrofits generell kaum Platz für die innen verbaute Vorschaltелеktronik haben, gelingt es oft nur mit den teureren, platzsparenden Bauteilen alle Bauelemente für die verschiedenen Aufgaben unterzubringen. I.d.R. stört die erzeugte Hitze stets durch die relative Nähe zum Chip/Heatsink. Oft ist die besonders günstige Ware nicht funktentstört, was eindeutig gegen die EU-Vorschriften verstößt. Ein kurzer Test mit einem tragbaren Radio bringt dies aber schnell ans Ohr.

8.2.1.2. Glühfaden-Imitate

Seit kurzem finden sich immer mehr Retrofit-Hersteller, die eine Bulb mit durchsichtigem Glas anbieten, das den Blick auf mehrere in Glühfadenform angereihte

8. LED-Lampen und -Leuchten

Mini-Leds ermöglicht, die jeweils Strang-weise mit dem gelben Phosphor überzogen sind. Diese Leuchtmittel sind als Ersatz für Lüster-Lampen gedacht, wo der Blick auf das Leuchtmittel frei ist und das Leuchtmittel daher ähnlich wie eine Glühbirne mit klarem Lichtglas wirken soll. Die besagten Retrofits fallen durch einen unterdimensionierten bzw. fehlenden Heatsink auf, somit sind Hitzeentwicklung und Lichtkraft deutliche Grenzen gesetzt, da die Abwärme über das Glas geführt werden muss. Entsprechend sollten die einzelnen kleinen LEDs nicht zu heiß werden, damit das Ding auch hält. Die Idee zu den Filament-LED-Lampen kam aus China, europäische Hersteller waren wie ich auch anfänglich sehr skeptisch und sind relativ spät auf diesen Zug aufgesprungen. Weil aber inzwischen eine Filament-LED-Lampe von Philips, Osram oder Sylvania nur wenig mehr als die NoName-Variante aus China kostet, empfiehlt sich auch hier der Kauf eines Markenprodukts.

8.2.1.3. Sonderform Maiskolben

Eine prinzipiell leistungsfähigere Alternative für die Birnenform ist die „Maiskolbenform“ (Korn), weil mit dieser Bauart mehr LEDs untergebracht werden können. Auch der Abstrahlwinkel ist durch die zylindrische Anordnung vorteilhaft. Man sollte aber sowohl die Größe des Leuchtmittels prüfen, als auch feststellen, ob die Leuchte ausreichend Blendschutz auf das Retrofit bietet, d.h. ob wegen der Größe oder Bauart der Leuchte eine unangenehme Blendung erfolgt. Gute Produkte arbeiten mit einem System aus Alu-Heatsink, außen oder innen und zusätzlich dem Kamineffekt, welcher durch zahlreiche Löcher im Gehäuse für Durchlüftung (Konvektion) sorgt. Bei billiger Ware und das ist leider derzeit wohl die Mehrheit am Markt, sind lediglich die Platinen aus Aluminium, ein echter Heatsink fehlt. Diese Maiskolben-Retrofits sind innen komplett hohl und daher am entsprechend der Baugröße geringen Gewicht zu erkennen. Von solcher Ware sollte man besser die Finger lassen. In Tests von Stiftung Warentest haben sich bei dieser Chinaware schnell mal die Lötstellen oder Verbindungen aufgelöst, mit der erheblichen Gefahr für Stromschläge.

8.2.1.4. Resüme: LED-Bulbs

Letztlich muss der Kunde ganz individuell entscheiden, ob das spezielle LED-Retrofit für seine Ansprüche bzw. seine Leuchte und seinen Einsatzzweck gut geeignet ist, weil es von seiner Größe, Leistung, Abstrahlcharakteristik und Lichtfarbe zu der Leuchte bzw. zur gewünschten Anwendung passt oder eben auch nicht. Der Laie kann anhand der auf der Verpackung angegebenen Lumenzahl im Verhältnis zur Wattage einschätzen, wie effizient das Leuchtmittel arbeitet, bzw. es mit anderen Produkten vergleichen. Um ein Ausprobieren wird man selten herumkommen.

8.2. Retrofits nach Lichtcharakteristik u. Sockeltyp



Abbildung 8.5.: Retrofit in Maiskolben-Bauweise

8.2.2. LED-Spots

Spot heißt „(Leucht-) Fleck“ im Englischen und bezeichnet als Abkürzung für Spotlight Leuchtquellen, die ihr Licht nicht allseitig abstrahlen, sondern konzentriert auf einen Fleck richten, damit der punktförmige Bereich, bzw. das was sich in diesem befindet hervorgehoben wird. Spots werden nicht nur im Theater verwendet, sondern schaffen Lichtakzente durch die gezielte Hervorhebung von Teilen der Inneneinrichtung. In Deutschland hielten die Spots mit den Niedervolt-Seilsystemen Einzug in die Privathaushalte und fanden sich bald in zahlreichen abgehängten Decken wieder.

8.2.2.1. LED-Spots MR16/GX5.3 u. MR11/GX5.3

„M“ steht für „multifaceted“ (multi-fazettiert), R für Reflektor und die Zahl 16 gibt den Durchmesser in amerikanischen 16/8 Zoll (51mm) an. Der kleinere, viel weniger übliche Bruder MR11 hat demzufolge einen kleineren Reflektordurchmesser von 11/8 Zoll. Die Bezeichnung GX5.3 bzw. GU5.3 bezeichnet den Sockeltyp, der 2 dünne Pins (Anode-/Kathode-Stift) im Achsen-Abstand von 5,33 mm hat. Der Erfolg der Halogenspots beruht auf seiner angenehmen Lichtfarbe, seiner halbdurchlässigen Reflektoren und das damit erzeugbare Spiel mit Licht und Schatten bzw. die Möglichkeit bestimmte Einrichtungsobjekte stimmungsvoll in Szene zu setzen. Der Nachteil von Halogenleuchten ist, dass sie ordentlich Strom ziehen. In der stärkeren Ausführung des MR16 werden dies immerhin 50W/Spot bei einer relativ schlechten Effizienz von 15 Lumen per Watt. Die Lebensdauer beträgt ca. 2000 Betriebsstunden. Das Halogenlicht erzeugt eine sehr angenehme warme Lichtfarbe mit einem CRI von 95 bei 3000K und lässt sich stufenlos und flackerfreien Dimmen.

Die ersten LED-Spots auf dem Markt waren wegen einer Effizienz von 40lm/W mit

8. LED-Lampen und -Leuchten

ihren 2 oder 3 Watt nicht leistungsfähig genug, um die volle Leuchtkraft des 50W-Halogen-Spots zu ersetzen. So konnten nur die 25 Watt-Halogenspots mehr schlecht als recht damit getauscht werden. Der Grund für die geringe LED-Leistung war und ist bis heute der, dass die Abwärmeführung der LED wegen der beschränkten Platzverhältnisse Schwierigkeiten bereitet. Der 1:1 Ersatz von 50W-Halogenspots mit LED-Spots ist inzwischen wegen der besseren Effizienz der LEDs und wegen ausgeklügelter Heatmanagement-Techniken möglich. Solche MR16-Retrofits haben eine Leistungsaufnahme von 8W und höher, bei einer Effizienz von 90lm/W und mehr. In fast allen Fällen wird dabei aber die ursprüngliche Baugröße (50x50x38mm) überschritten, da der Heatsink größer sein muss. Eine Ausnahme bilden die normal großen Spots, mit Bautiefe um 5cm, mit eingebautem aktivem Lüfter. Meiner Meinung nach ein Unding, da sie den Staub anziehen, und wie jeder Lüfter irgendwann laut werden. Man kennt das vom Notebook etc.. Während der Halogenspot in seinem Innersten Betriebstemperaturen von 250° C erreicht, die am Glas-Reflektor immerhin noch 150° C ergeben, und durch seine unempfindlichen Bauteile keinen Schaden dabei nimmt, bekommt die LED schnell Probleme, wenn die erzeugte Abwärme zu hohe Temperaturen erzeugt.

Neben dem LED-Chip selbst, der bei länger andauernder Übersteigung der zulässigen Junction-Temperatur ausfällt, nimmt auch die sehr nahe platzierte Vorschaltetelektronik bei dauerhafter Hitze Schaden. Die Faustregel aus meiner Erfahrung besagt, dass ein LED-MR16-Spot, der so heiß wird, dass man ihn nicht mehr mit der bloßen Hand anfassen mag ($>75^{\circ}\text{C}$), zu heiß wird. Je nachdem, wie er dann tatsächlich verbaut wird, bzw. wie viel Luft seinen Heatsink kühlen kann, ist kurz- oder mittelfristig mit einem Hitze-Schaden zu rechnen.

Gerade im Deckenbereich, wo die Leistung groß sein sollte und der Spot oft schwenkbar gewünscht wird, stößt die Geometrie des MR16 (bzw. GU10-) Retrofits Platz-technisch an seine Grenzen. Vielfach ist nämlich nur sehr wenig Raumtiefe zwischen Gipskarton und Betondecke vorhanden. Leistungsstarke LED-Spots haben jedoch meist eine längere Bauform, als die ursprünglichen Halogen-Spots mit ihren 50mm, da der Heatsink möglichst groß sein sollte und die Elektronik mit mehr Abstand zur LED weniger warm wird. In den USA, wo es kaum Betondecken gibt, ergeben sich diese Probleme weniger. Werden die Spots in geschlossene Holzkonstruktionen verbaut, was im Küchenbereich oder in Geschäftsauslagen nicht ungewöhnlich ist, muss unbedingt für eine ausreichende Hinterlüftung gesorgt werden.

MR16-Retrofits besitzen verschiedene Abstrahlwinkel. Ihrem Spot-Charakter entsprechend sind diese traditionell eher 36 oder 38°, was beim Einsatz in der Zimmerdecke dann unvorteilhaft sein könnte, wenn die Spots relativ weit auseinander platziert

8.2. Retrofits nach Lichtcharakteristik u. Sockeltyp



Abbildung 8.6.: Leistungsabhängige Bauhöhe bei PAR16-Retrofits

sind. Die Hersteller bieten aber meist zwei oder mehr verschiedene Abstrahl-Winkel-Größen bis zu 60° an.

Die Lichtfarbe des Spots wird von Privatkunden meist um die 3000K gewählt, weil sie dem gewohnten Halogenlicht am ehesten entspricht. Nach aktueller EU--Verordnung müssen LED-Retrofits für den Privatbereich einen CRI von mindestens 80 haben. Das ist zwar weit weniger als die 95 des Halogen-Pendants, genügt aber normalerweise, wenn die LED keinen Farbstich aufweist. Je nach Qualität des Spots werden unterschiedliche Optiken eingesetzt. Inzwischen oft zu einem einzigen Bauelement verbundene Acryl-Kollimatoren mit Mikrolinsen auf der Oberfläche zur Lichtverteilung. Auch hierfür lohnt sich ein Test, um zu sehen, ob das Licht im Punkt des Auftreffens gleichmäßig verteilt ist und keine Schatten oder Falschfarben entstehen.

Man kann vernünftigerweise keine generellen Aussagen darüber treffen, ob ein Spot dazu eine, zwei oder mehrere einzelne Lichtquellen haben sollte, denn es kommt hier vor allem auf die Güte der Sekundäroptik an, wie gleichmäßig sich ggf. die einzelnen LED-Kegel vermischen. Glasoptiken werden hier inzwischen seltener eingesetzt, da gute relativ teuer sind und günstige zu Farbrändern und Lichtbrechung neigen.

Spots ohne Sekundär-Optiken geben zwar am meisten Licht aus, wirken aber wegen des ungerichteten Lichts (120°) eher leuchtschwach auf der beleuchteten Fläche selbst. Ihr Einsatz ist nur dann sinnvoll, wenn keine bestimmte Fläche explizit angestrahlt werden soll.

MR16-GU5.3-Retrofits kann man mit 12V-Wechselstrom betreiben, da sie die

8. LED-Lampen und -Leuchten



Abbildung 8.7.: Linsen-Optiken bei PAR16-GX5.3-Spots



Abbildung 8.8.: MR16-Retrofit mit und ohne wirksame Sekundäroptiken

Halogenlampe ersetzen sollen. Dazu sind ein Gleichrichter und weitere Vorschalt-elektronik im Sockelbereich verbaut, die auch erkennt, ob z.B. Gleichstrom anliegt. Elektronische Trafos für MR16-GU5.5 Retrofits sind meist von kompakter Bauweise und üblich bis zu einer Nennleistung von ca. 100W. Die angegebene Mindestlast bei älteren Trafos für Halogenlampen (bei 100W 35W) soll nicht unterschritten werden, da es sonst schnell zum Flackern kommen kann. Genauso sollte etwas Luft nach oben bis zur Leistungsgrenze bleiben, da der Trafo sonst überlastet wird. Trafos an die schon zu viel Last gehängt wurde, reagieren oft mit Blinken. Idealerweise greift man zu einem modernen „Zero load“-Trafo, einem Gerät, das auch ohne Mindestlast arbeitet. Diese sind manchmal teurer als konventionelle Tronic-Trafos, lassen sich aber mühelos mit wenig LED-Retrofits betreiben, die man dann auch flackerfrei herunter dimmen können sollte.

Eine gute MR16 sollte sich unproblematisch dimmen lassen. Der Hersteller gibt die MR16 dann als dimmbar an, wenn sie sich bei Wechselstrombetrieb prinzipiell dimmen lässt. I.d.R. Kann man dann nur in einem begrenzten Bereich herunter

8.2. Retrofits nach Lichtcharakteristik u. Sockeltyp

dimmen, je nach Dimmer und verbauter Elektronik. Nicht alle Kombinationen aus MR16, Trafo und Phasenabschrittdimmer arbeiten wirklich problemlos zusammen. Große LED-Leuchtmittelhersteller verweisen auf ihren Webseiten auf Tabellen, in denen nachgesehen werden kann, in welcher Kombination das eigene Retrofit gut, annehmbar oder gar nicht arbeitet. Probleme tauchen z.B. öfters auf, wenn nur sehr wenige MR16 angesteuert werden, oder die Leistungsgrenze des elektronischen Trafos fast voll ausgeschöpft wird. Meine Erfahrung ist die, dass sehr günstige Leuchtmittel eher Probleme mit Inkompatibilität bereiten, wie relativ höherpreisige. Der Betrieb mit 12VDC als Alternative zum 12VAC und einem zwischen Konverter und Leuchtmittel geschalteten PWM-Dimmer funktioniert meistens auch, da sich diese retrofits i.d.R. auch mit Gleichstrom betreiben lassen und dabei sogar effizienter arbeiten.

Fast alle derzeit sich auf dem Markt befindlichen MR16-GU5.3-Retrofits können beim Herunterdimmen einen leisen Summ-Ton erzeugen, der je nach Konfiguration auch schon mal weniger leise ausfallen kann. Das Summen entsteht durch die Zerhackung des Eingangssignals, bzw. durch resultierende Resonanzerscheinungen bei den beteiligten Bauteilen. In einem Fall aus der Praxis, wo mehrere solche LED-Spots in eine abhängige Decke eines Kinderzimmers eingebaut wurden, hat sich durch ungünstige Resonanzbedingungen in der Gipskartondecke, das Summen der einzelnen Spots derart vervielfacht/multipliziert, das die Lautstärke im gedimmten Zustand unerträglich war und die Spots getauscht werden mussten.

Die Länge der Zuleitung zwischen dem elektronischen 12V-Trafo und dem LED-Leuchtmittel sollte zwei Meter nicht übersteigen, was in der Praxis nicht immer einfach zu realisieren ist. Das liegt insbesondere am „Skin-Effekt“, der den Widerstand der Leitung erhöht (siehe Kapitel Elektrischer Widerstand), wodurch die Leuchtmittel weniger hell leuchten und die Leitung erwärmt wird. Zum zweiten wirkt das ungeschirmte Kabel wie eine Funk-Antenne, die Netzschwingungen, wie z.B. die unerwünschten Oberschwingungen, als elektromagnetische Funkwelle abstrahlen kann. Da die Antennenlänge stets mit der Funkfrequenz korreliert, versucht man durch Längen-Beschränkung die Störung von terrestrischen Frequenzen zu vermeiden.

Besonders günstige Retrofits haben, sofern es nicht einfach nur herabgesetzte Auslaufmodelle sind, sehr wahrscheinlich neben einer schlichten Elektronik auch eine preisgünstige Optik. Für die MR16-LEDs gilt daher gleiches wie für die LED-Bulbs: Bevor sich jemand für die Anschaffung einer größeren Menge an MR16-Retrofits macht, sollten unbedingt vorher Tests die uneingeschränkte Eignung für den jeweiligen Einsatz bestätigen. Bei guten Retrofits rauscht das Radio nicht, die Wärme hält

8. LED-Lampen und -Leuchten

sich im Rahmen und der Lichtstrahl überzeugt. Hält man Spots mit unterschiedlichem Abstrahlwinkel (beam-angle) nebeneinander an die Wand oder Decke, sind die Leuchteigenschaften wie Lichtfarbe, Lichtstärke und Homogenität gut vergleichbar.

8.2.2.2. MR16/GU10-Retrofits

In Europa hat sich schon vor der LED die Halogen-Version der MR16 in der GU10-Variante durchgesetzt, weil sie auf Platz raubende, externe Netzteile verzichtet, was bei der massiven Ziegel- und Betonbauweise vorteilhaft ist und sie einfach anzuschließen ist. Rein äußerlich unterscheiden sich die GU10 Spots von den GU5.3 oft nur durch den etwas anderen Stiftsockel mit den massiveren, am Ende auf 5mm verdickten Stiften, die einen Achsen-Abstand von 10mm besitzen und Aufnahme in einem Bajonett-Verschluss finden. Die Stifte sind aus Sicherheitsgründen dicker, weil beim GU10-Spot Netzspannung mit 230V statt 12V-Kleinspannung anliegt. Folglich ist die Elektronik der Retrofit wie die bei der LED-Bulb mit einem Spannungswandler, einem kleinen Schaltnetzteil ausgestattet. Nicht alle GU10-Retrofits sind dimmbar. Gute Hersteller geben geeignete Dimmer von unterschiedlichen Herstellern für ihr GU10-Retrofit an. Gute LED-Phasenabschnittdimmer können leicht unangenehm mit einem hohen Preis überraschen. Ausprobieren ist immer angesagt, auch wenn LED- und Dimmer-Hersteller identisch sein sollten.



Abbildung 8.9.: Diverse Bauarten von GU10-Retrofits

Betreibt man eine große Anzahl von 230V-LED-Retrofits in einem Haus-Netz, wirkt sich die damit vergrößerte Blindleistungsproblematik deutlich negativ auf das Stromnetz aus. Die i.d.R. sehr geringen Platzverhältnisse im Netzteil des Retrofits erlauben keine aufwändige Power-Faktor-Korrektur, wie es größere Schaltnetzteile ab 75 W besitzen. Weil keine Blindstromkompensation erfolgt, summieren sich die Blindströme der einzelnen Spots so sehr, dass sich der Strom-Leiter erhitzen

kann und Spannung auf dem Null-Leiter anliegt. Gerade für ältere Gebäude mit relativ klein dimensionierter Verkabelung sollte man dann alternative Lösungen bevorzugen.

8.2.2.3. PAR-Strahler (E27)

PAR-Strahler kommen eigentlich aus der Veranstaltungstechnik, wo sie in PAR-Bühnenscheinwerfern Verwendung finden. Die kleineren Formen hatten aber auch in die Privathaushalte Einzug gehalten, wo sie meist mit konventionellen Glühdraht-Spots betrieben wurden. PAR steht für Parabolic Aluminized Reflector, was nichts anderes heißt, als dass der Glasreflektor mit Aluminium beschichtet wurde, genau wie bei dem MR16-Halogenspot, der gelegentlich auch als PAR 16 bezeichnet wird. PAR 20 steht für einen 20/8 Zoll Durchmesser, das entspricht ca. 63mm, weiterhin sind PAR30/36/38/56 u. 64 gebräuchlich. Für den Einsatz im Privatbereich sind 12° und 30° Abstrahlwinkel gebräuchlich. Die LED-PARs ersetzen von der Leuchtkraft her konventionelle Glühlampen-Technik. Für professionelle Bühnenscheinwerfer wird auf Retrofits inzwischen verzichtet und auf Komplett-LED-Spots, die DMX-dimmbar sind zurückgegriffen.

LED-PAR-Strahler gehören zu den ersten Retrofits, die am Markt erhältlich waren. Die allermeisten kamen aus China, leider sind viele davon schon ausgefallen... Neuere Modelle haben die Kinderkrankheiten beim Heatmanagement überwunden und sehen auch moderner und gefälliger aus. Beim Kauf ist aber unbedingt auf die Größe des Strahlers zu achten. Beim PAR Nachbau halten sich anscheinend nicht alle Retrofit-Hersteller an die ursprünglichen Größen, so ist es mir passiert, dass die neue PAR30-Serie eines großen Produzenten dadurch aufgefallen ist, dass sie nicht mehr in die genormten Scheinwerfergehäuse passen. Wegen des großen Heatsinks sind die Leuchtmittel relativ schwer und unhandlich beim Einbau. Wer Dimmen will, muss etwas mehr Geld ausgeben und natürlich unbedingt auf die entsprechende Herstellerangabe achten.



Abbildung 8.10.: Alte und neuere Bauformen PAR38-Retrofits

8. LED-Lampen und -Leuchten

8.2.2.4. 12V-AR111/G53

Die AR111 ist ein klassischer Halogen-Spot in flacher Bauweise mit 111mm Durchmesser für den Einsatz in Shops, Hotellerie und in Bürogebäuden. Der Sockel heißt G53, wobei sich 53 auf den Abstand der flachen Steck-Kontakte in mm bezieht. Die AR111 ist als LED-Retrofit stark nachgefragt, weil die Halogenlampe 50 oder 75 Watt zieht, oftmals in 2er oder 3er Gruppen in Leuchten verbaut ist und dann entsprechende Stromkosten verursacht.

In der Retrofit-Version werden aus Ähnlichkeitsgründen häufig offene Reflektor-Bauweisen angeboten, die ca. 10 W verbrauchen. Der LED-Chip sitzt dann seitlich oder, nach hinten auf den Reflektorgrund abstrahlend, in der Spotmitte. In der geschlossenen Bauweise wird mit üblichen Kollimatoren gearbeitet. Nicht allen Herstellern gelingt es, die Hitze wegen des limitierten Platzes Richtung Sockel gut abzuführen. Entscheidend ist hier oft, dass bei fehlendem Heatsink der Reflektor einen guten Kontakt mit dem Leuchtengehäuse hat und die Wärme entsprechend dahin weiter abgeben kann.



Abbildung 8.11.: Retrofit Typ AR111 mit G53 Sockel

8.2.2.5. ES111/GU10

Der ES111-Strahler ist das 230V-Äquivalent zum AR111, es hat daher einen Stiftsockel wie ein GU10-Leuchtmittel und den Stromwandler im Sockelbereich verbaut. Beim Kauf von ES111-GU10-Retrofits muss unbedingt die Bautiefe beachtet werden, die für den Einsatz in der erforderlichen Leuchte notwendig ist. Ansonsten gilt Ähnliches wie bei den AR111-Retrofits.

8.2.3. GX 53

Leuchtmittel mit GX53 Sockel werden hauptsächlich als Möbelleuchten verwendet. Sie finden sich z.B. unter Küchen-Wandschränken, Wandborden oder als Regalbeleuchtung. Der Stiftsockel mit Achsenabstand von 53mm wird in einen

8.2. Retrofits nach Lichtcharakteristik u. Sockeltyp



Abbildung 8.12.: Retrofit Typ ES111 mit GU10 Sockel

Bajonettverschluss gedreht. Vor der LED waren von den Herstellern sogenannte Energiesparlampen verbaut, also Kompaktleuchtstofflampen mit gewendelter, kleiner Leuchtstoffröhre. Bei den LED-Retrofits gibt es 2 Bauweisen: oft sind viele leistungsschwächere LEDs verbaut, das spart einen richtigen Heatsink, bringt aber nur mäßige Leistung. Wenn mehr Leistung gefordert ist, kommt man um einen Heatsink nicht herum. Nicht alle Leuchtmittel sind auch mit elektronischen Trafos (ordentlich) dimmbar, hier gilt es abermals, die Sache wenn möglich vor der Anschaffung zu testen.



Abbildung 8.13.: Auf- bzw. Unterbau-lampen mit G53 Sockel

8.2.4. Halogenersatz G4/G9-Sockel

Viele Leuchten im Privathaushalt wie Stehleuchten, Tischleuchten etc. werden/wurden mit kleinen aber relativ leistungsstarken Halogenbirnen betrieben. Die Niedervoltbirnchen mit G4-Sockel haben einen Stift- (Pin) Abstand von 4mm und erreichen Leistungen von 1,5 bis 50 Watt.

Sie werden genauso wie ihre Verwandten, die Hochvolt-G9-Halogen-Leuchtmittel im Betrieb sehr heiß. Einige Retrofit Hersteller nutzen die Kleinspannung für eine offene Bauart. Daran wäre noch nichts auszusetzen, wenn aber zu viele SMDs

8. LED-Lampen und -Leuchten



Abbildung 8.14.: G4-Retrofits in teilweise gewagten Bauformen

auf eine Platine und das Ganze ohne funktionellen Heatsink gepackt werden, wird die Lebenserwartung minimiert und man fragt sich, was sich der Hersteller dabei gedacht hat. Die obskuren Dinger werden im Internet auch bei veritablen Shops zu Preisen um die 10 Euro angeboten. Die meisten Käufer ahnen nicht, dass sie ihr Geld schlecht angelegt haben, weil sich die Physik eben nicht dauerhaft austricksen lässt, das Teil bei Wattagen über 2 Watt den Hitzetod sterben wird.

Die G9 hat einen Ösen-artigen Pin-Sockel mit 9mm Achsenabstand für den Anschluss an 230V-Netzspannung. Im Leuchtmittel muss also noch Platz für ein miniaturisiertes Schaltnetzteil sein. Auch wenn das mit kleinen Bauteilen zu erreichen ist, verlangen gerade leistungsfähigere LEDs nicht nur mehr Hitzeabführung, sondern eben auch mehr Platzbedarf für das Netzteil.



Abbildung 8.15.: G9 Retrofits in diversen Wattagen bzw. Bauformen

Beide Halogentypen sind mit LEDs in der Originalgröße nicht 1 : 1 zu ersetzen, da die für die vergleichbare Leistung nötige Anzahl der LEDs mit ihren entsprechend großem Heatsink-Bedarf i.d.R. nicht in die vorhandenen, beschränkten Platzverhältnisse der alten Leuchte passt. So stellt sich ganz auf den Einzelfall bezogen die Frage, ob ein Ersatz mit LED-Retrofits hier wirklich sinnvoll ist, bzw. ob man vielleicht auf Lichtleistung verzichten kann. Ausprobieren zeigt, ob das Leuchtmittel vernünftig

8.2. Retrofits nach Lichtcharakteristik u. Sockeltyp

einsetzbar ist. Die G4-LED-Retrofits auf dem Markt werden in unterschiedlichen Größen von 1,5 W bis 6,5 Watt und entsprechenden Qualitäten angeboten, manche sind tadellos einsetzbar und trotz geringer Größe sogar dimmbar, andere sind überdimensioniert. Letztlich sind diese Retrofits ein weiteres anschauliches Beispiel, dass der Retrofit-Ansatz mit LEDs manchmal nur bedingt funktioniert.

8.2.5. G23, G24dx bzw. G24qx

Die ursprüngliche G23-Sockel-Lampe ist eine aus einem Rohr gebogene CFL Kompakt-Leuchtstofflampe mit Stecksockel für Decken- und Wandleuchten in Bürogebäuden, Shops, Krankenhäusern und anderen öffentlichen Gebäuden. Der Name rührt vom 2-Stift-Stecksockel her, der einen Achsenabstand von 23 mm besitzt. Elektriker bezeichnen die Lampe als Dulux S, ein Artikelname von Osram. Sie gehört zur Kategorie der Energiesparlampen, da sie bei der höchsten Leistungsklasse von 11W je nach Lichtfarbe bis zu 900 lm erreicht. Im Sockel ist bereits der Starter verbaut. Der Ersatz mit einer LED-Retrofit ist möglich, das Problem liegt aber in der andersartigen Abstrahlcharakteristik.

Viele LED-Retrofithersteller beschränken sich auf eine einseitige Anordnung der SMDs und nutzen die Rückseite sinnvollerweise als Kühlkörper. Die ursprüngliche Leuchtstoffröhre strahlt aber vorteilhafter allseits ab. Je nach Verbau der Retrofit in der Leuchte kann dies zu Lichteinbußen führen, wenn z.B. die Rückseite trotz vorhandenem Reflektor deutlich dunkler bleibt.



Abbildung 8.16.: Retrofit mit G23-Stiftsockel

8. LED-Lampen und -Leuchten

Die traditionellen G24dx-Leuchtmittel gehören ebenfalls zur „Dulux“-Gruppe, haben jedoch 2 Röhren und einen etwas anderen Stiftsockel. Das X hinter dem D gibt die Leistungsaufnahme an, G24d18 z.B. steht für eine 18 Watt-CFL-Lampe mit Sockelabstand 24mm. Die Leistungsspanne geht bis 26 Watt bei ordentlichen 1800lm.



Abbildung 8.17.: Retrofits mit G24 Stiftsockel

Der G24qx-Sockel hat 4 statt 2-Pins. Das 2-Rohr-CFL-Leuchtmittel wird an einem elektronischen Vorschaltgerät betrieben und ist dementsprechend dimmbar und relativ effizient. Genau das macht den sinnvollen Ersatz mit einer LED-Retrofit derzeit noch fraglich, denn die Ersparnis hält sich in relativ engen Grenzen, was die Amortisationszeit des LED-Retrofits, mit seinem wesentlich höheren Anschaffungspreis, ungünstig erhöht. Der übliche Verbau in geschlossenen Downlight-Gehäusen bringt meist eine nur mäßige Luftzirkulation mit sich, was sich negativ auf die Kühlung der LED auswirkt, auch wenn der Heatsink an sich eigentlich ausreichend groß dimensioniert ist. Die großen Leuchtmittelhersteller können ihre CFL-Lampen deshalb weiterhin noch gut verkaufen und halten sich selbst bisher mit LED-Alternativen zurück.

8.2.6. LED-Röhren (Tubes)

Die LED-Tube gehört neben den Bulbs und Minispots zu den Retrofits mit der stärksten Nachfrage und einem entsprechend großen Angebot. Erst seit kurzem erreichen die LED-Röhren aber auch die Leistungsfähigkeit der konventionellen Leuchtstoffröhre. Da hier viele LEDs verbaut werden müssen, um einen homogenen Lichteindruck zu erzeugen und wegen limitierter Heatsink-Fähigkeiten der Tube die LEDs nicht maximal angesteuert werden sollten, ist der Preis entsprechend relativ hoch angesiedelt, was einer der Gründe ist, warum bisher ein großflächigen

8.2. Retrofits nach Lichtcharakteristik u. Sockeltyp

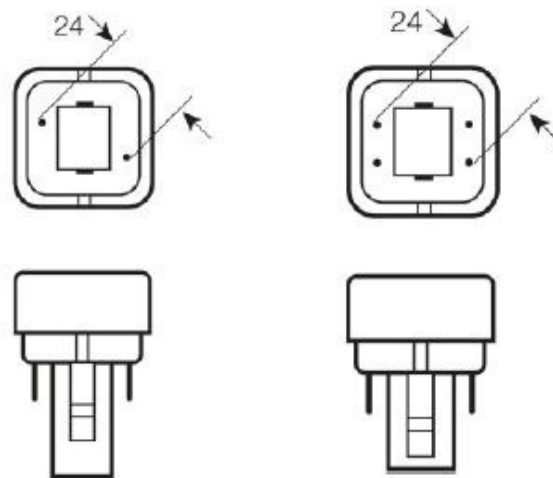


Abbildung 8.18.: Sockeltypen G24

Austausch der vielen Millionen Leuchtstoffröhren gar nicht stattgefunden hat. Ein weiterer Grund dürfte darin begründet sein, dass die Leuchtrichtung der LED-Tube maximal halbkreisförmig ist und sich so ein anderes Leuchtbild ergibt. Für abgehängte Büroleuchten, die einen Teil des Lichts nach oben zur Deckenbeleuchtung auslassen, fallen LED-Tubes daher flach. Jetzt werden manche denken, dass es doch LED-Röhren mit zweiseitiger Abstrahlrichtung auf dem Markt gibt... Das stimmt leider, geht aber natürlich auf Kosten der Hitzeabführung und macht bei leuchtstarken Röhren überhaupt keinen Sinn.

Ein zusätzliches Problem birgt der notwendige Verbau der Vorschaltелеktronik in der Röhre, nahe an der Hitze produzierenden Platine. Aus Platzgründen kollidiert dieser Ansatz automatisch mit der Anforderung, dass die Elektronik wenig Hitze abbekommen sollte. Aus Preisgründen wird bei chinesischen Herstellern oft minderwertige Elektronik verbaut, die keine Blindstromkompensation enthält und kurzlebig bleibt. Der Heatsink besteht bei fast allen Röhren aus einer geriffelten Aluwand, bildet die Hinterseite der Röhre und ist entsprechend suboptimal in seiner wirksamen Geometrie. Die Elektronik befindet sich dazwischen, quasi in einer regelrechten Backröhre.

Nur bei der Verwendung möglichst vieler LEDs, die auch eine sehr gute Effizienz besitzen müssen, damit relativ viel Licht und wenig Wärme produziert wird, lassen

8. LED-Lampen und -Leuchten



Abbildung 8.19.: Geöffnete LED-Röhre

sich die Betriebs-Temperaturen der Tube niedrig genug halten, damit die Tube auch in geschlossener Verbauung, wie z.B. als geschlossene Wannenleuchte, lange leben kann. Dies wirkt Kosten-treibend genau so wie aufwendigere, störfreie Vorschalt-elektronik, die möglichst wenig oder keinen Blindstrom erzeugt.

Wer also viele günstige LED-Röhren gleichzeitig betreibt, ohne anderweitig für Blindstromkompensation zu sorgen, wird sehr wahrscheinlich ein ungeahntes Problem in seinem Hausnetz bekommen.

Die Hersteller versuchen Produkte auf den Markt zu bringen, die einen schnellen und reibungslosen Austausch der alten Röhren ermöglichen. Das ist aber gar nicht so einfach, denn die alte Vorschaltel Elektronik, die in der Leuchte verbaut ist, wird nicht mehr benötigt. Der zu erfolgende Umbau stellt außerdem einen Eingriff dar, bei dem prinzipiell die technische Zulassung der Leuchte erlischt, was gerade in öffentlichen Gebäuden ein Problem ist, das ganz verschieden gehandhabt wird. Je nach Alter der Röhrenleuchte gibt es drei verschiedene technische Prinzipien der Ansteuerung. Ganz früher wurde mit einfachen Vorschaltgeräten gearbeitet, die konventionelle Magnetspulen als Drossel einsetzen (KVG).

Der technische Nachfolger war das sogenannte „Verlustarme Vorschaltgerät“ VVG, das zwar auch auf dem Spulenprinzip basiert, aber durch Verwendung besserer Materialien für den Trafo und einer effizienteren Spulengeometrie, die hohen Verlustleistungen des KVGs reduzieren konnte. Das VVG wurde aber sehr bald von elektronischen Vorschaltgeräten abgelöst, die gar keinen Starter mehr benötigen und in der Warmstart-Version die Kathoden in der Röhre vorheizen. Im Gegensatz zu den Vorgängern werden beim EVG kaum Oberwellen erzeugt, Blindstrom ist kein

8.2. Retrofits nach Lichtcharakteristik u. Sockeltyp

Thema und die Lebensdauer von EVG-betriebenen Röhren ist so relativ viel höher. Außerdem flimmern sie nicht mehr sichtbar, wie das bei den alten Röhren oft der Fall war.

Der Privatkunde kann i.d.R. nicht einschätzen, um welchen Typ es sich bei ihm zuhause handelt, wie die Leuchte speziell verschaltet ist und wie ein erfolgreicher Umtausch demzufolge konkret erfolgen müsste. Auch viele Elektriker zeigen sich verunsichert, da sowohl LED-Tubes-Versionen mit Starter-Austausch, als auch welche mit Überbrückungskabel angeboten werden, die das Vorschaltgerät ganz umgehen.

Inzwischen sind auch die großen Leuchtmittelhersteller massiv in das Geschäft mit Retrofit LED-Tubes eingestiegen, wenn auch mit deutlicher Verzögerung und drücken nun die Preise, um ihre alte Vormachtstellung wieder zu erlangen. Dies kann man als beruhigendes Zeichen dafür werten, dass die aktuelle Technik so eigentlich inzwischen grundsätzlich funktioniert.

Ich selbst behalte mir aber eine gewisse Skepsis aus den zuerst genannten Gründen vor und plädiere für einen kompletten Ersatz der ganzen Röhren-Leuchte, statt einem Tausch des Leuchtmittels. So kann wesentlich spezifischer auf die Erfordernisse der LED eingegangen werden und es werden keine faulen Kompromisse mehr für ein gutes Ergebnis nötig. LED-Langfeldleuchten dieser Art sind schon zahlreich auf dem Markt und inzwischen liegen bei höherer Leistungsstärke im Preis fast gleichauf mit Langfeld- oder Wannenleuchten, die zwei Röhren nebeneinander verbaut haben und deshalb doppelte LED-Tube Bestückung erfordern würden.

8.2.6.1. T8/G13, T12/G13 Tubes

T8 steht für die am meisten verbaute Röhre mit einem Durchmesser von 8/8 Zoll, das sind 25,4 mm (= 1 Zoll = 1 Inch). Sie löste vor vielen Jahren die alten T12-Röhren ab mit ihrem 38mm Querschnitt. Beide besitzen einen G13-Sockel mit 2 Pins in 12,7 mm Achsenabstand. Die Röhre wird in einen Drehverschluss eingedreht und dabei arretiert.

Viele LED-Tubes besitzen zusätzlich einen Sockel, der selbst drehbar ist, um die einseitige Abstrahlung wie gewünscht zu justieren. Gebräuchliche Längen für T8-Tubes sind 150/120 und 60 cm, Zwischengrößen gibt es, wurden aber selten verbaut. Legt man die aktuellen Preise für T8-Retrofits einer Amortisation-Rechnung zugrunde, kommt man häufig auf Amortisationszeiten von ungefähr drei Jahren. Daher erwarten die Händler von ihren Herstellern, dass sie eine entsprechend lange Garantie von mehr als drei Jahren auf das Produkt geben und möglichst aussagekräftige Prüfsiegel wie VDE/TÜV/UL vorweisen, um die Bedenken der Kunden hinsichtlich

8. LED-Lampen und -Leuchten

Qualität und Produktsicherheit zerstreuen zu können.



Abbildung 8.20.: LED-Retrofit für T8 Leuchtstoffröhre mit opakem Lichtglas

Die T8 wird hauptsächlich als Langfeld-Universalleuchte zur Grundbeleuchtung in Büros, Gewerberäumen, Kellern und Tiefgaragen eingesetzt, Entsprechend sind neutral-weiße bis kalt-weiße Lichtfarben gefragt. Der Händler freut sich, da kältere Farben i.d.R. eine höhere Effizienz, kurz Lumenzahl bedeutet und er argumentativ besser mit der Leuchtstoffröhre konkurrieren kann. Aus den gleichen Grund, wurde in den letzten Jahren noch vielfach auf klare Abdeckungen zurückgegriffen, damit die milchige Lichtabdeckung nicht ein Viertel des Lichtes verschluckt. Dementsprechend blenden diese LEDs, in normaler Deckenhöhe verbaut, bei direktem Blickkontakt und das spot-förmige Licht sieht irgendwie minderwertig aus. Diese Blendung ist gar nicht zulässig, siehe Arbeitsstätten-Richtlinien-Verordnung der EU, so dass für klare Abdeckungen der Verbau in geringen Deckenhöhen und eine Wandmontage eigentlich ausscheiden. In jüngster Zeit können gute LED-Röhren hinsichtlich Leuchtkraft bzw. Lichtausbeute die Leuchtstoffröhren voll ersetzen und amortisieren sich vor allem mit ihren Vorgängern, den KVG- und VVG-betriebenen Röhren, in vernünftigen Zeiträumen.

8.2.6.2. T5 (T16)/G5 Tubes

Die T5 Röhre ist schlanke 5/8 Zoll bzw. 16mm dick, besitzt eine 2-Pin Sockel mit 5 mm Abstand und findet hauptsächlich in jüngeren Leuchten, z.B. Reflektor-Deckenleuchten ihren Einsatz. Trotz ihrer relativ geringeren Größe zur T8 ist sie wesentlich effizienter. Sie wurde konsequent für den EVG-Betrieb entwickelt, lebt entsprechend lang, ca. 20 Tausend Betriebsstunden und mehr und bietet mit einer Lichtausbeute von 97lm/W eine Effizienz, die einer aktuellen LED nicht weit nachsteht. Von daher ist ein Austausch aus Energiespar- bzw. Kostengründen derzeit

8.2. Retrofits nach Lichtcharakteristik u. Sockeltyp

eigentlich (noch) nicht vernünftig begründbar.



Abbildung 8.21.: LED-Retrofit für T5 Leuchtstoffröhren mit klarem Lichtglas

Trotzdem existieren T5-LED-Retrofits am Markt, die jedoch wegen der geringen Abmessungen zu wenig Platz für LEDs und Heatsink haben, um die gewünschte Leistung zu ermöglichen. Daneben ist auch kein Platz für ein integriertes Netzteil, so dass i.d.R. mit 12VDC-Technik gearbeitet wird. Die Verwendung solcher T5-Led-tubes bleibt somit grundsätzlich fraglich.

8.2.7. Sofitten-Lampen

Die Sofitte ist ein Glühdraht-Glaskolbenlämpchen, das mit 12V betrieben wird. Es findet sich heute hauptsächlich an vielen Stellen im Auto wieder, beleuchtet hier Kennzeichen, Kofferraum, Handschuhfach und den Fahrzeug-Innenraum. Die Standardgröße für die Kfz-Sofitte beträgt 10 x 36 mm. So mancher Kfz-Enthusiast hat schon negative Erfahrungen mit LED-Sofitten gemacht, z.B. weil ihn die Polizei auf die fehlende Zulassung für die Kennzeichenbeleuchtung angesprochen hat, oder das Ding von nur kurzer Lebensdauer war.

LED-Sofitten gibt es schon länger, weil die chinesischen Hersteller sich wohl einen großen Markt versprochen. Viele Konstruktionen sind leider derart abenteuerlich in der Größe über sich hinausgewachsen, um genügend LEDs für ein Viel an gewünschter Leistung unterzubringen. Man kann sich fragen, wo diese Dinger überhaupt Platz finden sollen. Taugliche Produkte bis 1,5 W, wie sie auch namhafte Hersteller anbieten, arbeiten nur mit einer LED bzw. einem gegenüberliegenden Paar, da sonst zu viel an Wärme erzeugt wird, wo doch eigentlich kein Raum für einen Heatsink vorhanden ist. Entsprechend begrenzt sind in vernünftiger Hinsicht die Einsatzmöglichkeiten.

8. LED-Lampen und -Leuchten



Abbildung 8.22.: Größen-Problem Leuchtkraft bei LED-Sofitten

Chinesische Lötünstler scheinen überhaupt kein Problem mit der unvermeidbaren Hitzeentwicklung zu sehen.. vielleicht gehen sie einfach davon aus, dass es in Europa ständig hohe Minusgrade hat und sich ein Heatsink daher erübrigt...



Abbildung 8.23.: kurzlebige Power-Sofitten

8.2.8. Bauart-bedingte Grenzen bei Retrofits (Leuchtrichtung, Wärme)

Retrofits können alte Lampen sinnvoll ersetzen, sofern ein ausgeklügeltes technisches Konzept dahintersteckt. Mit rund 25 tausend Stunden Lebensdauer kann die Leuchte damit noch sehr lange leben, so dass das Retrofit nicht mehr getauscht werden muss. Die eben vorgestellte T5-LED-Tube ist ein gutes Beispiel dafür, dass das LED-Retrofit-Konzept aber in einigen Bereichen an seine natürlichen Grenzen stößt, wo die vorgegeben Bedingungen keine richtigen Vorteile für die LED als Leuchtquelle zulassen. Seriöse Händler nehmen ihre fachliche Verantwortung ernst und kommunizieren diese besonderen Fälle offen und ehrlich an ihre Kunden. Man kann also zusammenfassend feststellen, dass je kleiner ein leuchtstarkes, konventionelles Leuchtmittel ist, desto schwieriger wird ein adäquater und somit sinnvoller Ersatz im LED-Bereich. So gibt es beispielsweise keinen sinnigen Ersatz für die in den Privathaushalten viel eingesetzten Halogenstab-Leuchten (z.B. im Deckenfluter etc.) mit R7s-Sockel, da diese Leuchtmittel viel Leistung (150-500W) auf sehr wenig Platz generieren. Wer hier teuren Strom sparen will muss die ganze Leuchte wechseln. Gleiches gilt für Strahler und Flutlichter mit Halogen-Lampen in dieser Leistungsklasse.

8.2. Retrofits nach Lichtcharakteristik u. Sockeltyp

Alle LED-Tubes und die meisten Bulbs tun sich wie erwähnt etwas schwer, den bisher gewohnten Lichteindruck aufgrund ihrer anderen Abstrahlcharakteristik so zu reproduzieren. Viele Kunden, die zunächst nur an die Stromersparnis denken und sich nicht oder schlecht informieren (lassen), zeigen sich nach dem Retrofit-Kauf in ihren großen Erwartungen enttäuscht. Informieren und Ausprobieren heißt die Alternative zum Retrofit-Frust. Eine wichtige Frage wird bei für die Leuchte eigentlich ausreichend dimensionierten Heatsinks zu selten gestellt: Kann die vom Heatsink abgeführte Hitze kontinuierlich weiter an die Luft abtransportiert werden, damit die Kühlung letztlich auch wirklich funktioniert?

Betrachten wir dazu einen überspitzten, rein hypothetischen Fall: der Kunde kauft im Internet eine kleine E14-LED-Retrofit-Lampe mit einem unter Normalbedingungen ausreichendem Heatsink für deren Lichtleistung. Diese Retrofit wäre rein von der Größe und der Fassung her eigentlich gut geeignet, seine Glühbirne im Backofen zu dessen Beleuchtung zu ersetzen...

Der Backofeneffekt stellt sich regelmäßig auch in üblichen Deckenleuchten/Downlights ein, wo kein ausreichender Luftaustausch zur Kühlung stattfinden kann. Das LED-Retrofit köchelt dann im wahrsten Sinne des Wortes solange vor sich hin, bis die Elektronik versagt, auch wenn der Retrofit-Hersteller selbst konstruktiv eigentlich alles richtig gemacht hat.

Viele Retrofit-Verkäufer, das gilt insbesondere für den Großhandel im B2B-Bereich und Baumärkte im B2C-Bereich, sind angesichts der angesprochenen, komplexen Thematiken ungenügend geschult. Zum anderen wollen sie den Kunden nicht absichtlich verunsichern und ihn so vielleicht vom Kauf abhalten. Sie verstecken sich daher gerne hinter den als „unverbindlich“ einzustufenden Herstellerangaben nach dem Motto „ich hab auch nie jemandem etwas Falsches versprochen“. In Supermärkten und im Internet findet meist gar keine Beratung statt, der Kunde ist auf sich gestellt. Da bleibt nur die Hoffnung, dass der in nur noch geringer Zahl übrig gebliebene Fachhandel sich genügend Zeit für eine hinreichende Aufklärung nimmt. Rein betriebswirtschaftlich ist diese aber wegen des relativ zeitintensiven Beratungsaufwands fast schon wieder fraglich, denn die Gewinnspannen bei Retrofits sinken drastisch, eine halbstündige Beratung wegen weniger Retrofits rechnet sich nicht.

8.3. LED-optimiertes Leuchtendesign

In einigen Jahren, wenn Retrofits nur noch eine untergeordnete Rolle spielen, werden nahezu alle mit LED betriebenen Leuchten auf die Charakteristik der LED hin optimiert sein. Das wird neben einer neuen Formen-Sprache auch technische Änderungen bei der Ansteuerung mit sich bringen. In den Kapiteln elektrische Ansteuerung und Wärmemanagement wurde ja bereits ausführlich auf die Notwendigkeiten für ein gutes technisches LED-Leuchten-Design eingegangen.

8.3.1. Langfeldleuchten (linear luminaires)

Die klassische Langfeldleuchte der Vergangenheit war die lange T8-Leuchtstoffröhre (z.B. 150cm). Sie und ihre kürzeren Verwandten wurde für (aneinandergereihte) Lichtbänder eingesetzt, stets mit dem Nachteil, dass die Abstände zwischen den einzelnen Lampen aus Gründen der Stückelung und allein schon wegen der Halterungen unvermeidbar waren und so je nach Abstand des milchig-streuenden Lichtglases der Leuchtdichte-Unterschied als „gap“ sichtbar war. Mit der LED-Technologie ist dieses Problem wesentlich besser in den Griff zu bekommen. Die Leuchtenlänge muss sich prinzipiell nicht mehr an den verschiedenen Standardmaßen der Leuchtstoffröhren orientieren. Je nach Abstand der LEDs zueinander und Abstand zur Streuscheibe können zumindest theoretisch Lichtbänder in beliebigen Längen erzeugt werden. In der Praxis bestimmt die Länge der LED-Platine (linear light engine) und die Länge des Aluminiumprofils bzw. Gehäuses die Leuchtenlänge, die i.d.R. ein Vielfaches der vorhandenen Platinenlängen ausmacht. Die Anzahl der Platinen, die mittels Steckkontakten direkt zusammengeschaltet werden können ist durch den kleinen Durchmesser der Leiterbahn begrenzt. Daher muss für längere Leuchtensysteme von einem dickeren Leiter aus neu eingespeist werden. Vorteile für die LED im Bereich der Langfeldleuchten ist ihre kompakte Größe und ihr Abstrahlverhalten. Im Gegensatz zu der Platz einnehmenden Bauform mit Röhren und ihren nötigen Reflektoren, sind so relativ flachere und insgesamt kleinere Bauweisen bei LED-Leuchten möglich.

Langfeldleuchten sind für unzählige Anwendungsbereiche von Interesse, dementsprechend ist die Nachfrage groß. Mittlerweile werden sie vermehrt zur Gestaltung von Wänden und Böden, z.B. auch für Fassaden, so wie überhaupt im Außenbereich gewünscht. In vielen Fällen der Innenbeleuchtung werden vorhandene Leuchtengehäuse genutzt, in dem man Retrofit-LED-Tubes einsetzt, die aber nicht für diese Gehäuse ausgelegt sind. Bessere Ergebnisse erzielt man mit LED-Langfeldleuchten, die das Licht effizienter abstrahlen. Für spezielle Bereiche, z.B. Regalbeleuchtung in Supermärkten, bieten gute Hersteller entsprechend Aufgaben-optimierte Optiken, in diesem Fall welche mit definierter, asymmetrischer Lichtverteilung an.

8.3.1.1. Vouten-Beleuchtung (Cove-Lighting)

Die Voute ist der (ursprünglich gewölbte) Übergang zwischen Wand und Decke, im Englischen steht „cove“ auch für Wölbung oder Bucht. Die Voutenbeleuchtung die (indirekte) Beleuchtung des äußeren Deckenrandes mit vom Raum aus unsichtbaren Linien- bzw. Langfeldleuchten. Je nach Ausformung der Vouten-Nische bzw. Platzierung der Leuchte darin, kann ein mehr oder weniger breiter Lichtstreifen an der Decke erzeugt werden, der für eine stimmungsvolle indirekte Beleuchtung sorgt. LED-Langfeldleuchten sind wegen der oben genannten Vorteile gegenüber Leuchtstoffröhren und aufgrund ihrer Dimmbarkeit dafür ideal geeignet. Die Voutenbeleuchtung hält somit auch in nicht-herrschaftliche Räumlichkeiten größeren Einzug und findet sich neben der Gastronomie, die oft auf RGB-Farben setzt, auch in Privathäusern und vermehrt in öffentlichen Gebäuden wieder. Viel mehr ist diese Beleuchtungsart aber in Amerika und anderen Ländern, wo traditionell viel mit Holz gebaut wird, verbreitet. Die nötigen „Coves“ lassen sich in Holz- oder Trockenbauweise relativ einfacher und flexibler erzeugen und man kann die Schaltnetzteile besser verstecken, als wenn es sich um Ziegel und Beton handelt. Voutenbeleuchtung mit LED kann eigentlich nicht billig sein, da viele LEDs zum Einsatz kommen müssen.

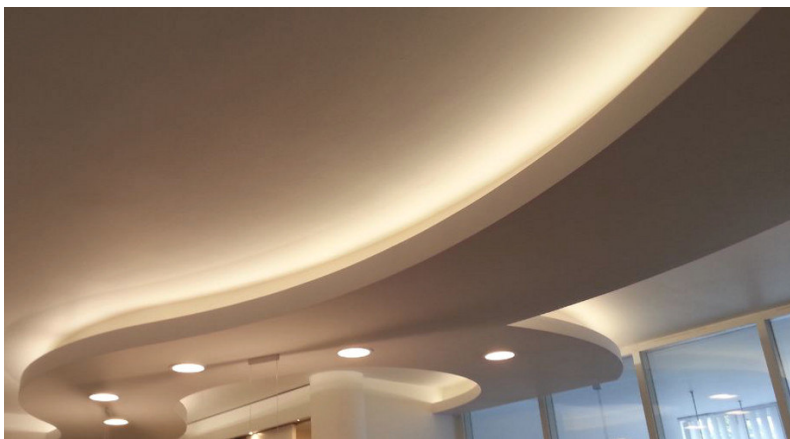


Abbildung 8.24.: Voutenbeleuchtung mit weißen LEDs

Eine gelungene Voutenbeleuchtung erfordert Erfahrung und nicht zuletzt auch genaues Arbeiten bei der Installation, da der Lichtschein relativ empfindlich auf kleinste Abweichungen, bzgl. der zur Wand parallelen Leuchte, Lücken zwischen den Segmenten und bzgl. eines planen Untergrunds, reagiert. Damit man nicht in die Lichtquelle blicken kann, bzw. die Leuchten nicht sieht, ist eine Sichtschutzkante

8. LED-Lampen und -Leuchten

nach vorne nötig, die gleichzeitig den Lichtaustrittswinkel und den inneren Rand des Lichtstreifens bestimmt. In den meisten Fällen ist ein eher weicher, statt scharf gezeichneter Lichtverlauf gewünscht, wo der Lichtstreifen sich Richtung Deckenmitte verläuft. Dazu kann je nach Geometrie der Voute die LED liegend, seitlich oder in 45° Neigung positioniert sein. Verwendet man zusätzlich eine milchige Abdeckung wird die Streuung wesentlich erhöht. Dimmen ist hier ein zusätzliches Highlight, an dem nicht gespart werden sollte.



Abbildung 8.25.: RGB-Voute im Außenbereich

Anbieter von Voutenbeleuchtung bieten modulare Systeme aus koppelbaren Langfeldleuchten oder individuell gefertigte, passgenaue Lösungen an. Eine gute Voutenbeleuchtung zeichnet sich durch eine gleichmäßige Helligkeit auch bei großen Längen aus. Dazu wird bei modularen Systemen der Leiter durchgeschleift, damit die einzelnen Segmente parallel betrieben werden und die Leuchtkraftverluste durch den steigenden Widerstand unmerklich bleiben. Wer mit günstigeren LED-Strips arbeitet, um Kosten zu sparen, muss durch geschickt gewählte Mehrfacheinspeisung dafür sorgen, dass keine Unterschiede in der Helligkeit entstehen. Je höher die Kleinspannung, desto geringer die grundsätzliche Problematik. 12V-Systeme sind wenn überhaupt, dann nur für kurze Strecken zu empfehlen.

8.3.1.2. Langfeldleuchten im Interior-Bereich

LED-Langfeldleuchten können sehr kompakte bis zierliche Abmessungen haben, was sie z.B. für die integrierte Beleuchtung im Möbelbereich oder für Inneneinrichtungen ideal macht. Der hauptsächliche Einsatzbereich liegt in der stimmungsvollen Akzentbeleuchtung. Dabei bleibt die Leuchte selbst unsichtbar und setzt nur mit ihrem Lichtschein interessante Akzente. Thematisch ist das mit der Voutenbeleuchtung verwandt, nur in kleinerem Maßstab eben.

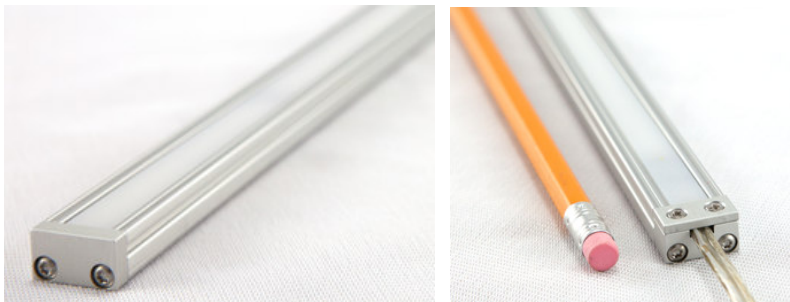


Abbildung 8.26.: Leistungsstarke LED Mini-Langfeldleuchte Fa. EST

Wenn die Langfeldleuchten dazu in Möbelteile wie Regalböden, Schrankwände etc. eingelassen / eingenuet werden soll, muss in erster Linie auf technische Machbarkeit geachtet werden und wieder steht dabei das große LED-Thema Heat-Management ganz vorne. Das Alu-Gehäuse einer Langfeldleuchte bildet im Normalfall gleichzeitig den Heatsink für die LED-Engine. Bei sehr kleinen Gehäusen ist entsprechend der geringen Oberfläche die Wärmeabgabe limitiert und somit die maximale LED-Leistung.

Wird das Profil in Holz eingenuet, verringert sich die effektive Konvektions-Oberfläche drastisch. Wegen der sehr guten Dämmeigenschaften von Holzmaterialien (λ -Werte: Holzfaser-Werkstoffe: 0,1 bis 0,040 W/mK; im Vergleich Alu: 180 - 286) wird die Holzwerkstoff-Umgebung erwärmt, im Holz selbst breitet sich, wegen geringer Wärmeleitfähigkeit, die Wärme aber nur schlecht aus. Im Effekt entsteht eine regelrechte Wärmedämmung, das Alu wird an den im Holz verbauten Stellen nicht gekühlt, sondern heizt sich in Ermangelung guter Konduktion und Konvektion weiter auf.

Was kann man tun? Auf jeden Fall empfiehlt sich der Einsatz von LEDs neuester Generation mit einer hohen Effektivität lm/W.. Dann muss entweder die LED-Leistung entsprechend begrenzt werden, oder das Alu-Gehäuse muss so gestaltet

8. LED-Lampen und -Leuchten

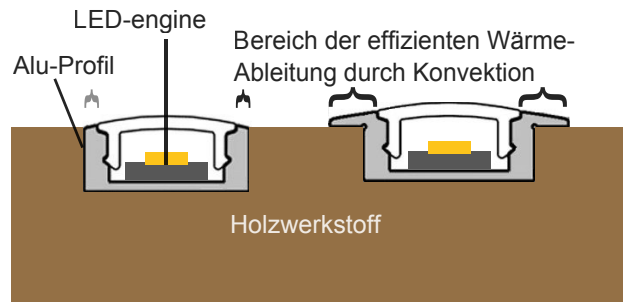


Abbildung 8.27.: Nutprofil-LED-Leuchten zum Einbau in Möbel

sein, dass die Kontaktfläche zur Luft erhöht wird, eventuell auf Kosten der Eleganz. Mit sogenannten Flügel-Profilen erreicht man Verbesserungen in der Wärmeabfuhr, natürlich nur bis zu einem gewissen Grad.

Die Planung einer Schrank- oder Regalbeleuchtung mit LED-Linienleuchten ist nicht so trivial wie man irrtümlich vielleicht meinen könnte. Es gilt auf technischer Seite z.B. die Kabel versteckt unterzubringen, außerdem müssen Konverter und Dimmer oder Controller (bei RGB) zugänglich und unsichtbar platziert werden. Bei eingenuzten Profilen ist darauf zu achten, dass die Nut das Material nicht schwächt, weil sie zu tief ist. Als Faustregel gilt für die Holzbearbeitung: Die Nuttiefe sollte nicht mehr wie ein Drittel der Materialstärke betragen.

Wie können die Leuchten geschaltet bzw. gedimmt werden? Die Industrie hat interessante Lösungen mit Sensor-Schaltern, oder Infrarot-Schaltern, die auf Annäherung (z.B. der Hand) reagieren im Angebot. Der Kauf und der Einbau erhöht aber die Kosten... Dimmen kann man elegant über 1-10V-Schnittstellen und in Wandschaltern verbaute elektronische Potentiometer oder Taster lösen. Fernbedienungen sind dann eine Alternative, wenn andere Optionen wegen baulicher Voraussetzungen nicht zur Verfügung stehen.

Die Funktionalität sollte bei allen Überlegungen der Beleuchtungsplanung generell im Vordergrund stehen. Fernbedienungen werden z.B. leicht verlegt, bzw. stören durch ihre Vielzahl. Die größte Herausforderung liegt meist in der Lichtplanung selbst. Folgende Fragen stehen im Raum: Was soll beleuchtet werden, welchen Zweck hat die Beleuchtung und wie ist die Leuchte dazu so zu platzieren, dass sie selbst unauffällig bleibt? Nicht zu unterschätzen ist die Tatsache, dass sich das Licht benachbarter Lichtquellen gegenseitig beeinflusst, d.h. alle Leuchtquellen

mit ins Kalkül gezogen werden müssen. Je nachdem, welche Materialien verbaut sind, bzw. welche Reflexions-Eigenschaften diese durch Farbe und Struktur besitzen, kann der resultierende Lichteindruck stark abweichen. Kommen stark spiegelnde Materialien wie Glas, Granit, Marmor oder Fliesen ins Spiel muss außerdem beachtet werden, dass unter Umständen die eigentlich versteckte Lichtquelle durch Spiegelung plötzlich sichtbar wird. Der Effekt hat schon so manche Beleuchtung von Küchenarbeitsplatten, Badezimmer spiegeln, Vouten oder Sockelblenden zur Enttäuschung werden lassen.

8.3.1.3. LED-Strip als Basis für Linear- und Akzentbeleuchtung

Die Leuchtenindustrie bietet LED-Strips zum einfachen Verbau für Zwecke der Linearbeleuchtung, oft zu relativ günstigen Preisen an. Der Strip besteht aus einem flexiblen, ca. einen Zentimeter breiten PCB (Printed Circuit Board) mit meist 5 Meter Länge, auf dem SMD-LEDs gleicher Bauart in gleichem Abstand aufgesetzt sind und mit gedruckten dünnen Kupfer-Leiterbahnen verbunden sind. Kleine Vorwiderstände sitzen zwischen den LEDs zur Strombegrenzung. Die Strips sind für weiße LEDs in sehr unterschiedlichen Leuchtstärken, Lichtfarben und leider auch Qualitäten auf dem Markt.

RGB-Strips werden meist mit 5050 SMDs angeboten, da diese regelmäßig 3 LEDs pro Chip verbaut haben und weisen je nach Anzahl der verbauten SMDs pro Meter (z.B. 60/120/..) eine unterschiedliche Gesamtleistung / Leuchtkraft auf. Letztlich erreichen RGB-Strips bei gleicher Wattage dennoch weit weniger Leuchtkraft wie die weißen LEDs, was einfach an der geringeren Effizienz von roten und grünen LEDs liegt. Wer mit RGB-Strips auch weißes Licht erzeugen will, sollte wegen des fahlen, grau-stichigen RGB-Weiß-Tons auf das schönere Weiß der RGB+W-Variante zurückgreifen, bei der abwechselnd zur RGB-SMD auch warm-weiße LEDs verbaut sind. Bei günstigen RGB+W-Produkten kann die Lebenszeit des Strip vermindert sein, da RGB- und Weißlicht-LEDs unterschiedliche Leistungsaufnahmen besitzen, die mit standardisierten Vorschaltwiderständen vielleicht nicht exakt ausgeglichen werden können.

Neben den normalen Strips gibt es auch solche mit IP65-Schutz gegen (Strahl-) Wasser. Im ungünstigsten Fall wird dieser mit einem billigen Kunststoffüberzug oder mit einem simplen Schrumpfschlauch versucht zu erreichen. Im besten Fall wird eine hitzebeständige klare Silikonschicht aufgebracht, die den Strip mitsamt den SMDs auf der Oberseite komplett überzieht und abdichtet. Schlechte Schutzüberzüge erkennt man schnell am unangenehmen beißenden Geruch und spätestens nach einiger Betriebszeit an gelben Verfärbungen, Rissbildung und Verhärtung. Die Un-

8. LED-Lampen und -Leuchten

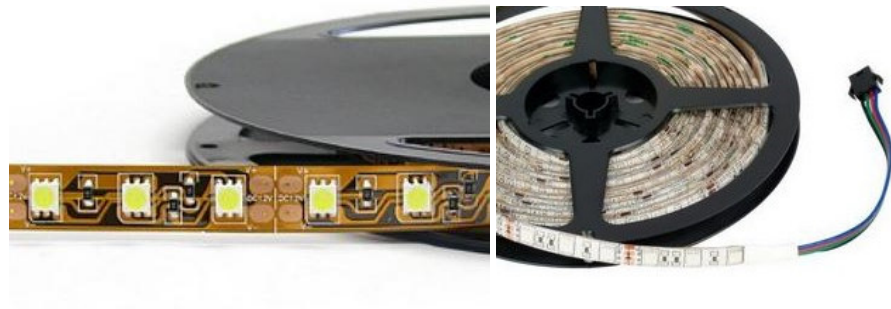


Abbildung 8.28.: LED-Strips in weiß und RGB

beständigkeit des ungeeigneten Kunststoffes führt relativ bald zum Totalausfall, oft leider auch zu Branderscheinungen.

Die Rückseite aller Strips muss unbedingt mit einer Hitze abführenden Schicht aus durchsichtigem Spezialkleber (z.B. von 3M) ausgestattet sein, womit der Strip direkt auf einen geeigneten Heatsink geklebt werden kann. Wirklich wichtig ist es, vor dem Aufkleben das Aluminium gründlich zu entfetten, damit die Haftung und Hitzeableitung gewährleistet ist. Am besten nimmt man dazu professionelle Produkte. Wer glaubt, dass er sich das Aluminium zur Hitzeabführung sparen kann, wird mit dieser Überlegung nur bei Strip-Leistungen bis 5 Watt pro Meter Erfolg haben können. Ich empfehle, stets eine Hitze abführende Unterlage für Strips einzuplanen, weil sie deren Lebenszeit damit wesentlich erhöht. Selbstverständlich muss die Weiterleitung der Hitze vom Alu stets gewährleistet sein... Je mehr und je leistungsfähigere SMDs verbaut sind, desto wichtiger wird ein ausreichend dimensioniertes Alu-Profil, das in der Lage ist, durch seine möglichst große Außen-Oberfläche die entstehende Wärme an die Luft abzuführen.

Die Länge des Strips kann je nach Typ in regelmäßigen Abständen von z.B. 10 cm an den dafür vorgesehenen Stellen mit Lötkontakten gekürzt werden. Schneidet man nicht an der Markierung leuchtet das letzte angeschnittene Segment nicht, da die Leiter durchtrennt sind. Beim Umgang mit den immer auf Reel-Rollen aufgewickelten Strips muss man genau darauf achten, dass beim Abwickeln keine Knicke, Brüche oder sonstigen Beschädigungen des dünnen PCBs entstehen. Weil die Leiterbahnen zu den LEDs sehr dünn sind, steigt der Widerstand schnell mit der Striplänge. Bei 5 Metern Gesamtlänge resultiert daraus ganz schnell ein Helligkeitsverlust im Bereich von 5 -10%, je nachdem, ob er mit 12V oder 24V anzusteuern ist.

8.3. LED-optimiertes Leuchtendesign

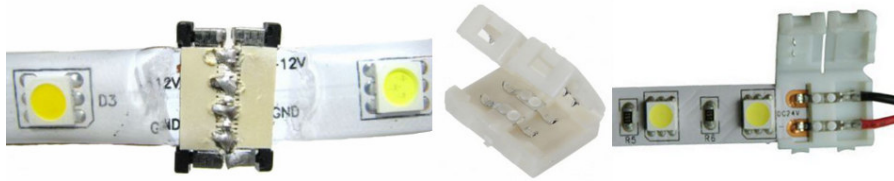


Abbildung 8.29.: Verbinder für LED-Strips

Manche Hersteller bieten Clip-Systeme zur Einspeisung und Verlängerung an, wo man ohne Löten auskommt, dies spart Aufwand und Zeit, stellt aber oft ein Hindernis beim Lichtaustritt der benachbarten LEDs dar und bietet letztlich weniger Kontakt-Sicherheit als eine saubere Verlotung.

Der bedeutendste Nachteil der LED-Strips ist die Tatsache, dass die allermeisten chinesischen Hersteller nur eine weiträumige Eingrenzung zur Lichtfarbe und Leistung machen. Das Wort Binning kann man bei den handelsüblichen Strips, die über 90% des Marktes abdecken, leider gar nicht verwenden. Aus Kostengründen wird ein Mix aus verschiedenen Binnings und oft von verschiedenen Herstellern verbaut, deren LEDs gerade günstig zu haben sind. Leider zum Nachteil des Kunden. Wird also das gleiche Produkt aus späterer Produktion nachgekauft, werden sehr wahrscheinlich Farbunterschiede beim direkten Vergleich festzustellen sein. Bei Billigprodukten findet sich schon innerhalb eines Strip ein relativ zu hoher Farbunterschied, den man vor allem dann gut sieht, wenn man eine opake Abdeckung davor hält.

Ich persönlich teile nicht die grundsätzliche Abneigung mancher Kollegen gegen dieses doch universell einsetzbare Leuchtmittel. Es kommt doch einfach nur auf die Qualität der Strips an und wie professionell, bzw. für welche Zwecke man sie letztlich dann auch einsetzt. Schließlich ist ein LED-Strip nüchtern betrachtet einfach nur die flexible Form einer starren LED-Engine.

Sicher stimmt es schon, dass die allermeisten Strips aus China in aller Regel keine hochwertigen LEDs der neuesten Technologie verbaut haben. Das muss sich dann auch in einer entsprechend relativ geringeren Effizienz (lm/W), einer geringeren Farbtreue und Farbkonsistenz widerspiegeln. Der Preis innerhalb verschiedener Typen richtet sich oft nach der Anzahl verbauter LEDs. Je mehr LEDs, desto teurer wird natürlich jeder Strip.

8. LED-Lampen und -Leuchten

Manche Produkte sind gezielt für den Heimwerkerbereich konzipiert und werden z.B. von den großen Bauhausketten oder Discounter in Auftrag gegeben und ohne ausreichende Installationsanweisungen verkauft. Anscheinend gehen die deutschen Händler unbeirrt von einer eher unbedeutenden Reklamationsquote aus, denn die Qualität der Billig-Strips ist leider zu oft regelrecht „unterirdisch“ und eigentlich regelmäßig per se ein berechtigter Reklamationsfall, ähnlich den Billigst-Heimwerkermaschinen im Baumarkt.

Nur eine Minderheit der Strip-Produkte zielt auf den professionellen Beleuchtungsmarkt ab. Der Kunde hat hier durchaus eine gewisse Auswahl, welche Chips mit welcher Range der Lichtfarbe eingesetzt werden und mit wie viel Milli-Ampere jede LED angesteuert wird. Bei Profi-Strips sind die LEDs gebündelt, so dass ein möglicher Ausfall vernünftig kompensiert werden kann. Der weniger erfahrene Anwender kann die Qualität der Strip-Produkte aber sicher kaum einschätzen und alleine der Verkaufspreis hier in Deutschland bietet leider keinerlei Anhalt für die Qualität.

Meine 10 Praxis-Tipps für den Einsatz von LED-Strips/Stripes:

1. Die weißen Strips sind den kupferfarbenen Strips vorzuziehen, denn letztere verfälschen die Lichtfarbe, wenn sie in Alu-Profilen verbaut werden. Das an die Stripoberfläche von der Alu-Profil-Innenseite zurück reflektierte und dort wieder nach oben abgestrahlte Licht bekommt einen deutlichen Rotstich
2. Strips mit IP-65 Schutz (oder höher) sollten in Silikon vergossen sein, die Nase erkennt schlechte Materialien am stechenden Geruch
3. In Umgebungen mit Feuchtigkeit unbedingt auf IP65-Schutz achten! Wasserfestigkeit (IP68) ist trotz eventueller Herstellerangabe bei Strips in der Praxis kaum zu erreichen, da die Verbindungs-/Kabel-Lötstellen kaum langfristig wasserdicht bleiben
4. 24V-Strips sind den 12V-Strips ab Längen von 3m vorzuziehen, da die dünnen Leiterbahnen den elektrischen Widerstand schnell erhöhen
5. Strips mit einer Nennleistung von über 5 W/m müssen auf ein geeignetes Aluprofil aufgebracht werden, das die entstehende Wärme ableiten kann
6. Die Strips müssen rückseitig einen speziellen Wärmeleit-Klebestreifen haben, der durchgängig nicht beschädigt sein darf. Normale doppelseitige Klebebänder sind nicht geeignet. Beim Verkleben muss der Strip an jeder Stelle fest mit dem Alu verbunden werden
7. Je dichter die SMDs zueinander stehen, desto weniger punktförmig bzw. desto gleichmäßiger ist der Lichteindruck. Für Strips mit weniger Power sollte man daher lieber auf solche mit vielen kleineren/schwächeren SMD-LEDs

8.3. LED-optimiertes Leuchtendesign

- zurückgreifen, damit die Abstände zwischen den LEDs nicht zu groß werden
8. Strips/Profile wenn möglich so anbringen, dass keine Blendung bei direkter Sicht auf die LEDs erfolgt, ggf. opake Abdeckungen anbringen
 9. Die Gesamtlänge eines Strip sollte auch bei 24V die 5 Meter nicht wesentlich überschreiten. Bei größeren Längen lieber erneut einspeisen, Einspeise-Stellen nebeneinander platzieren, damit keine sichtbaren Farbunterschiede entstehen
 10. Die Nennleistung des Konverters für die Strips etwas größer wählen als die Leistungsaufnahme des tatsächlich verbauten Strip. Die Eigenleistungsaufnahme eines PWM-Dimmers und Controllers dabei mit einkalkulieren

8.3.2. Paneel-Leuchten für Wand u. Decke

Seit wenigen Jahren gibt es sehr flache LED-Panels auf dem Markt, die nicht nur eine gleichmäßige Lichtverteilung auf der Paneel-Oberfläche selbst erreichen, sondern auch genügend Licht für den Einsatz zur Raumbeleuchtung erzeugen. Dies wird einerseits durch leistungsstarke LEDs erreicht, die von der Seite in das Lichtglas (aus Acryl) leuchten, andererseits durch Mikro-Optiken, die das Licht, das im Glas/Acryl gebrochen und reflektiert wird, effizient einsammeln und diffus und blendfrei nach außen leiten. Der Alurahmen nimmt die Wärme der LEDs auf, die von zwei oder vier Seiten das Acryl beleuchten und gibt sie an die Umgebungs-Luft bzw. an die Rückwand aus Alublech weiter.

Trotz erheblicher Fortschritte ist die maximal mögliche Fläche eines Paneels begrenzt. Das liegt an den unumgänglichen Lichtverlusten im Acrylglas, die bei zu langen Distanzen als Helligkeitsverluste auf der Oberseite auffallen.

Weil das Licht stark gestreut wird, wird die tatsächliche Lichtleistung des Paneels oft dann als relativ schwächer wahrgenommen, wenn das Paneel in Deckenhöhe befestigt ist. Paneels eignen sich deshalb gut zur Grundbeleuchtung, für die ausreichende Beleuchtung von Arbeitsplätzen etc. ist eine Abhängung zu empfehlen. Die Preise sind inzwischen im Internet für den Endverbraucher von 150 auf fast 60 EURO gefallen, auch für die Händler haben sich die EK-Preise halbiert. Leider begrenzt hier die Qualität der Vorschaltgeräte zu oft die Lebensdauer der Billig-Produkte. Panels besitzen Abmessungen, die mit dem Standard-Raster für abgehängte Deckenpaneelen zusammenhängen, z.B. 60 x 60 cm bzw. Teillängen davon (oder 120 x 30 cm). Für größere Dimensionen muss man auf eine andere Beleuchtungs-Technik zurückgreifen.

Die LED-Panels sind sehr vielseitig einsetzbar. Neben dem Deckeneinbau in abgehängte Decken, kann man sie mit Hilfe eines Vorsatzrahmens in Aufbautechnik

8. LED-Lampen und -Leuchten

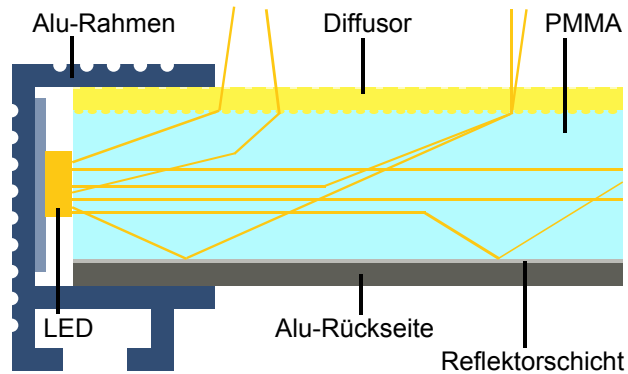


Abbildung 8.30.: Schema-Aufbau eines LED-Flachpanels

verwenden, oder mit einem Seilsystem abgehängt einsetzen. Die gleiche Technik wird auch für Einbau-Decken- und Wandleuchten mit kleineren Abmessungen oder in runder Form eingesetzt.



Abbildung 8.31.: LED-Flachpanels quadratisch und rund

8.3.3. Backlight-Module

8.3.3.1. Backlight-Panels

Wer zwar diffuses Licht benötigt, aber mehr Leistung erwartet, als Flachpaneels bieten können, wird vielleicht Backlight-Panels einsetzen. Bei Backlights sind die LEDs, wie der Name schon verrät, nicht seitlich, sondern flächig angeordnet. Die SMD-LEDs werden in einem bestimmten Abstand gleichmäßig auf eine rechteckige oder runde Aluplatte verteilt, die die Wärme aufnimmt. Je nach Abstand zueinander und Stärke der Chips kann mit einem diffusen Lichtglas ab einem bestimmten

8.3. LED-optimiertes Leuchtendesign

Abstand zum Alu-Paneel ein gleichmäßiger Lichteindruck erreicht werden. Meist sind es 3,4 oder 5 Zentimeter Abstand zwischen Platte und Streuglas, die schon ausreichen. Die Qualität der Streuscheibe ist dabei wichtig. Viele Hersteller bieten Makrolon oder Acryl an, das für die LED optimiert wurde. Das Backlight wird in einer ungeschützten Bauweise oder mit IP65-Schutz mittels Kunststoffüberzug angeboten.

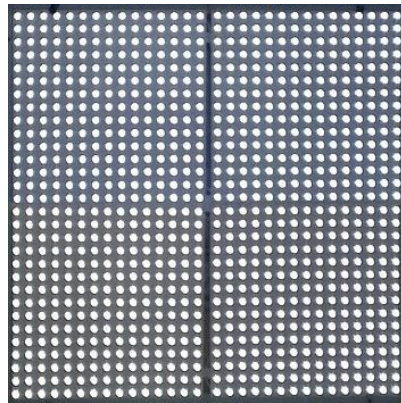


Abbildung 8.32.: Backlight-Panels zur Schaukasten-Beleuchtung

Die Standard-Auslegung der Leistung erfordert i.d.R. keinen zusätzlichen Heatsink hinter dem Alupaneel. Das macht diese Leuchtmittel, die man Modul-artig kombinieren kann z.B. ideal für den gewerblichen Einsatz zur großflächigen, gleichmäßigen Hinterleuchtung von Werbemitteln wie Displays, Schilder und Schaukästen. Sind leistungsstärkere oder entsprechend mehr LEDs pro Fläche verbaut, oder befindet sich das Backlight-Panel in einem geschlossenen Behältnis ohne Möglichkeit des Luftaustauschs, sind zusätzliche Maßnahmen zur Wärmeableitung unumgänglich.

8.3.3.2. Flexible Back-LEDs

Wenn die Backlightpaneele für solche Zwecke von der Geometrie her immer noch zu unflexibel sind, kann auf flexible Backlights zurückgegriffen, die speziell für die Beleuchtungsanforderungen in der Lichtwerbung konzipiert wurden. Die i.d.R. in Kunststoff vergossenen Module mit sehr breit strahlenden Linsen sind für den Außeneinsatz konzipiert, d.h. IP65 gegen Regenwasser/Feuchtigkeit geschützt. In Gruppen von 2 oder mehr LEDs pro Einheit werden diese an 2 Kabeln in gewissem Abstand zu Ketten aufgereiht, so dass man sie beliebig platzieren kann. Letzteres ist schwieriger als es vielleicht erscheint, da je nach Dichte der Verteilung ein anderer Helligkeitseindruck entsteht.

8. LED-Lampen und -Leuchten

Die Back-LEDs werden hauptsächlich für Leuchtschriften eingesetzt, wo jeder Buchstabe durch seine unterschiedliche Form eine spezielle Anordnung erfordert, damit ein gleichmäßiger Gesamteindruck aller Einzelbuchstaben bei der Leuchtschrift entsteht.



Abbildung 8.33.: Backlight Module IP67 (Osram/GE)

8.3.4. Einbauleuchten für Decke u. Wand

Einbauleuchten wirken weniger störend als die erhabene Aufbauvariante, wenn es um funktionelle Beleuchtung geht. Da auch hierzulande Trockenbau einen immer höheren Stellenwert einnimmt steigt auch im Wand-Bereich die Zahl der fest eingebauten Leuchten. Die LED-Leuchte mit ihrer relativ großen Wartungsfreiheit und Lebensdauer ist für dieses Segment prinzipiell im Vorteil. Zu beachten ist allerdings, dass die Möglichkeit der Kühlung/Wärmeableitung gegeben ist. Dies erfordert eine intelligente Konstruktion der Leuchte und Fachwissen beim Planer oder Monteur. Im Bereich der Betondecken sind Einbaudownlights bei Neubauten im Trend, dort werden ausreichend große Leuchtendosen mit Kabelkanälen und Hohlräumen für Konverter in die Deckenelemente eingegossen.

8.3.4.1. Deckenstrahler / Downlights

Downlights existieren in unzähligen Größen, besitzen verschiedenste Durchmesser und Bautiefen. Während im anglo-amerikanischen Raum die 2/4/6/8-Zoll-Varianten (1Zoll = 1Inch=2,54cm) als Standard-Durchmesser dominieren, wurden in Europa unzählige individuelle Maße der Hersteller verbaut, was bei Ersatzbedarf schon mal zum Problem werden kann. Traditionell wurden Downlights mit Metallhalogendampflampen bestückt (Philips: CDM, OSRAM: HQI), die mit einem

8.3. LED-optimiertes Leuchtendesign

Vorschaltgerät betrieben wurden. Vorteil dieses Leuchtmittels ist der sehr gute Farbwiedergabewert, solange die Lebenszeit nicht überschritten wird. Bei modernen Downlight-Ausführungen, die effizient mit elektronischen Vorschaltgeräten betrieben werden ist der adäquate Ersatz mit LED-Technik, wenigstens noch derzeit, nicht immer ökonomisch sinnvoll.



Abbildung 8.34.: Downlights für den Deckeneinbau

Das LED-Downlight wird häufig mit einem leistungsstarken COB-Chip betrieben, der einen entsprechend großen Kühlkörper erfordert. Je kleiner der Durchmesser des Downlights, desto schwieriger wird es, eine hohe Leistung zu erzielen. Die geeigneten Kühlkörper sind dann relativ hoch und erfordern eine ausreichende Einbautiefe. Wer neu baut, sollte die LED-Downlights kleineren Durchmessers den Retrofit-Versionen bestehend aus Einbauring und MR16-/GU10-Spot vorziehen, da erstere eine größere Leistung erzielen können.



Abbildung 8.35.: Downlights für den gewerblichen Deckeneinbau

Damit keine Blendung entsteht, empfiehlt es sich ggf. auf Streugläser oder Filtervorsätze zurückzugreifen, die bei guten Leuchten-Herstellern modular eingesetzt/ausgetauscht werden können. Gute Streuscheiben lassen viel Licht durch, und schaffen den Spagat zwischen Streuung und Lichtlenkung. Moderne Mikroop-

8. LED-Lampen und -Leuchten

tiken auf dem Lichtglas erfüllen hier sehr gute Dienste als Tertiäroptik. Je nach Beleuchtungszweck werden unterschiedliche Leistungsklassen, Durchmesser und Abstrahlwinkel angeboten. Für die Beleuchtung von (Regal-) Wänden kommen schwenkbare Reflektoren, oder solche mit asymmetrischer Bauweise zum Einsatz. Das Downlight wird i.d.R. mit einem integrierten Konstantstrom-Konverter betrieben. Gute Hersteller bieten dimmbare Versionen an und gegen Aufpreis z.B. die Möglichkeit der DALI-Ansteuerung. Für den richtigen Einsatz empfiehlt sich immer die Durchführung einer Lichtberechnung unter Verwendung der photometrischen Daten des Leuchtenherstellers.

8.3.4.2. Glasfaser-Beleuchtung

Glasfaserbeleuchtung als ein Mittel der Effektbeleuchtung kann stimmungsvolle Effektbeleuchtung nach dem Prinzip „Sternenhimmel“ erzeugen und hat den Vorteil, dass sie mit einer Lichtquelle auskommt, verteilt auf sehr viele einzelne Lichtpunkte. Das Licht wird über Glasfaser-Lichtleiter mittels Totalreflexion des Lichtstrahls zum gewünschten Ort geleitet und tritt dort am Querschnitt der Glasfaser aus. Für Glasfaser-Beleuchtung sind LED-Systeme derzeit noch in relativ kleineren Systemen im Einsatz.

Der grundsätzliche RGB-Vorteil der LED, der das übliche Farbrad vor dem Lichtgenerator eigentlich überflüssig macht, wird durch die geringe Leuchtstärke der LED-RGB-Leuchtquellen limitiert. Deshalb sind bei größeren Systemen ab 300 Lichtleitern immer noch Lichtgeneratoren mit Farbrad im Einsatz. Soll das Licht nicht nur Stimmung erzeugen, sondern auch beleuchten, greifen die spezialisierten Hersteller aktuell noch auf leistungsstarke, gekühlte Lichtgeneratoren auf Basis der Metallhalogendampf-Lampe zurück.

Warum wird nicht alternativ mit kleinen Einzel-LEDs gearbeitet? >> Aus praktischen und Kostengründen: Die Glasfaser ist sehr robust und erreicht sehr kleine Querschnitte (0,25mm), eine entsprechend kleine LED-Diode mit entsprechend dünnem Kabel wäre anfälliger für Kontaktprobleme, Wärmeabführung und Beschädigungen. Außerdem würde die kleine LED in Abhängigkeit der Kabellänge durch die Änderung des elektrischen Widerstands je nach Kabellänge einen spezifischen Vorwiderstand erfordern. Mit Lichtleitern sind im Unterschied zum Kupferkabel (unterschiedliche Längen kein Thema, auch nicht bei den Kosten.



Abbildung 8.36.: Generator für RGB-Glasfaser-Beleuchtung

8.3.4.3. Wand-Einbau - Flur- und Treppenbeleuchtung

Die Anforderungen an Beleuchtung sind in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Auch der Gesetzgeber hat normative Vorgaben erlassen, die sich nicht nur auf Mindestwerte der Beleuchtungsstärke je nach Ort und Funktion beziehen, sondern auch Kriterien wie Gleichmäßigkeit und Blendfreiheit fordern. Nehmen wir als Beispiel einen langen Flur, wie er in Krankenhäusern, Seniorenwohnheimen, Kellern und Hotels typisch ist. Kommt das Licht nur von der Decke bleibt diese selbst und vielleicht große Bereiche der Wände relativ dunkel, was es unserem Auge schwer macht, sich auf die resultierenden Helligkeitsunterschiede einzustellen. Oft geht es auch um die psychologische Komponente: mit Licht und Schatten kann Stimmung erzeugt werden, für das Sicherheitsbedürfnis ist andererseits eine gute und gleichmäßige Ausleuchtung förderlicher.

Eleganter als Aufbauleuchten sind gerade im funktionellen Bereich (Architectural Lighting), zumindest in vielen Fällen, Einbauleuchten, deren Gehäuse gegenüber dem erzeugten Licht in den Hintergrund tritt. Im Bereich Wandleuchten wird mit Flachpaneel-Leuchten oder meist asymmetrischen Wandstrahlern gearbeitet, die zusätzliches Licht auf Flurboden oder Treppenstufe bringen. Für Treppen gibt es auch LED-Langfeldleuchten, die direkt in das Profil der Trittkante eingearbeitet sind und die Setzstufe der Treppe illuminieren.

Bei fest eingebauten Wandstrahlern muss der Hersteller natürlich die Wärmeabführung konstruktiv sicherstellen, da viele Wände aus Gips einen entsprechend schlechten Wärmeleitwert besitzen. Gelöst wird das Problem i.d.R. mit einem Alu-Gehäuse und einer entsprechend ausreichend großen Oberfläche des sichtbaren

8. LED-Lampen und -Leuchten

äußeren Leuchtenteils. Nahtlos eingegipste Leuchten sind nur unter Bedingungen zu empfehlen, die jeden Wärmestau und somit den verfrühten Ausfall der LED-engine vermeiden.



Abbildung 8.37.: LED-Wandeinbauleuchte unten- und seitlich strahlend

8.3.4.4. Bodeneinbauleuchten für den Außenbereich

Die Gestaltung mit Licht für die Bereiche Veranda, Auffahrt oder Garten gewinnt an Bedeutung und erfordert entsprechend robuste Lösungen zur Unempfindlichkeit gegen Wasser und Trittbelastung. Die LED spielt auch hier ihre Langlebigkeit aus, sofern das Produkt von entsprechender Qualität ist, insbesondere hinsichtlich der Leuchtenkonstruktion. Geschlossene Aluminiumkörper sind Leuchtenkörpern aus Kunststoff vorzuziehen, da sie bei warmen Außentemperaturen die LED-Wärme weg bringen.

Billigangebote aus Fernost haben sich zumindest bisher trotz IP67-Angabe oft als nässeempfindlich herausgestellt, die Kapillarwirkung von feinsten Spalten wird regelmäßig unterschätzt. Ich empfehle deshalb, lieber gleich in Qualität zu investieren, das spart Nerven, Geld und Zeit. Begehbare Leuchten müssen auch der Beanspruchung durch spitze Absätze Stand halten, dies erfordert Sicherheitsglas oder sehr dicke Kunststoffe, die aber entsprechend kratzempfindlich sind. Viele Leuchten benötigen einen externen Konverter und einen entsprechenden, geschützten Platz für diesen, so wie wasserdichte Zuleitungen und ggf. geeignete Verteilungen. Bodenstrahler müssen so aufgestellt oder gestaltet sein, dass keine Blendung erfolgt. Die

8.4. Aufbauleuchten für Wand, Decke und Boden

gesamte Leuchtstärke der verbauten Leuchten ist bei allen Außenbeleuchtungen in Betracht zu ziehen, allzu schnell fühlt sich ein empfindlicher Nachbar davon gestört.



Abbildung 8.38.: LED-Boden-Einbauleuchten rund und Langfeld

Ungeteilte Langfeldleuchten aus begehbaren Profilen in spezifischen Längen erfahren eine gesteigerte Nachfrage zur Beleuchtung von Wegen, Einfahrten und Vorplätzen. Die maßgenaue Einzel-Fertigung erfordert aber entsprechende Erfahrung und so existieren leider zahlreiche Negativbeispiele missglückter Konstruktionen, die frühzeitig ausgefallen sind.

8.4. Aufbauleuchten für Wand, Decke und Boden

Aufbauleuchten haben den großen Vorteil, dass sie leicht zu befestigen sind und keine aufwändigen Vorarbeiten in Wand und decke erforderlich werden. Sie können so leicht getauscht und ersetzt werden, je nach Geschmack, Leuchten-Alter und Zeitgeist..

8.4.1. Aufbauleuchten für direktes Licht

Rechnet man Hängeleuchten mit ihrem Aufbau-Baldachin dazu, macht der Bereich der Aufbauleuchten zahlenmäßig den Großteil aller Leuchten aus. Im Privatbereich wurden vor allem Glühdraht-Leuchtmitteln oder zuletzt Energiesparlampen eingesetzt. Für die Ausleuchtung von Fluren und Treppenhäusern, die nicht über abgehängte Decken verfügen, wird zwangsläufig auch mit Aufbauleuchten gearbeitet. In öffentlichen und gewerblichen Gebäuden sind neben den Wannen- und Rasterleuchten für T8-/T5-Leuchtstoffröhren hauptsächlich Aufbauleuchten, die mit Energiesparleuchten (gewendelten Kompakt-Leuchtstoffröhren) bestückt sind,

8. LED-Lampen und -Leuchten

im Einsatz. Sie besitzen i.d.R. ein milchiges Lichtglas, um einen blendfreien, homogenen Lichteindruck zu erreichen. Dabei werden aber bis zu dreißig Prozents des erzeugten Lichts verschluckt. Der bloße Austausch des Leuchtmittels, mittels einer LED-Retrofits macht so auf der Kostenseite nicht immer Sinn, denn auch deren Licht wird vom Milchglas entsprechend hoch absorbiert.

Mit LED-optimierten Wand- und Deckenaufbauleuchten kann also in jedem Fall effizienter beleuchtet werden. Außerdem sinkt der Wartungsaufwand und die verbundenen Kosten, da kein Leuchtmittel mehr getauscht werden muss.



Abbildung 8.39.: Aufbauleuchten mit LED-Engine

Noch hält sich die Leuchtenindustrie insbesondere im unteren Preissegment mit entsprechender Vielfalt und Anzahl wirklich intelligent konzipierter LED-Aufbauleuchten zurück und versucht in allen Bereichen, von der Deckenleuchte bis zur Pollerleuchte für Außen, weiterhin konventionelle Modelle/Designs, ausgestattet mit Retrofit-Leuchtmitteln zu verkaufen. Hochwertige Hersteller haben die Herausforderung LED inzwischen größtenteils angenommen und bieten nicht nur für Hängeleuchten ein entsprechendes Produktportfolio an neuen technischen und optischen Designs an. Diese Leuchten kosten natürlich dann entsprechend mehr als die Massenware aus dem Baumarkt. Eine schnelle Billigkopie wie sie zu Zeiten des austauschbaren Leuchtmittels früher sehr leicht möglich war, scheitert hier schneller als früher an den neuen technisch-konstruktiven Herausforderungen.

8.4.2. Wandleuchten für indirektes Licht

Bei Wandleuchten wird viel auf indirektes Licht gesetzt, was im Gegensatz zur den Milchglasvarianten ein sehr vielfältiges, blendfreies Design ermöglicht, aber entsprechend der Reflexionsverluste, insbesondere die durch die Wandoberfläche, auch auf Kosten der Leuchtkraft geht. Neben den beliebten Up- & Down Leuchten sind immer mehr puristische bzw. geometrische, organische oder verspielte Formen im Angebot. Der Kreativität der Designer sind nur LED-technische Grenzen wie

Heat-Management und Ansteuerung gesetzt...

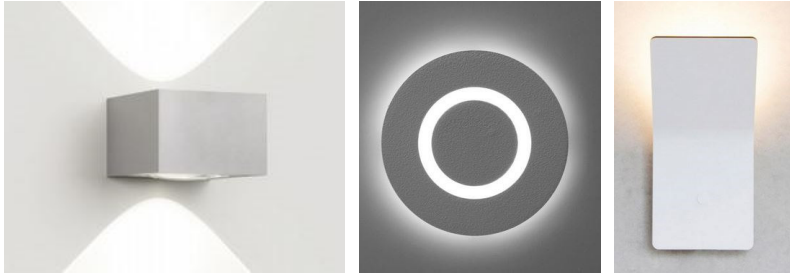


Abbildung 8.40.: Design-Wandleuchten

8.4.3. Echte Wallwasher

Wallwasher sind hochaktuell, da sie den neuen Trend, Wände nicht glatt, sondern erhaben geformt zu gestalten, ideal unterstützen, in dem sie die Wand effektiv mit variierendem Licht und dem entstandenen Schattenspiel erst richtig in Szene setzen. Die LED-Technologie ist für solche Wandfluter deshalb besonders geeignet, da auch mit RGB-Effekten gearbeitet werden kann.

Die Wallwasher sind leuchtstarke Langfeldleuchten mit eng abstrahlenden Optiken, die nahe der Wand, meist unten am Boden, Modul an Modul platziert werden. RGB+W-Ausführungen mit einer professionellen DMX-Steuerung bieten die meisten Möglichkeiten.

In anderen Fällen wird die LED-Beleuchtung gleich in die Wand integriert. Das Licht scheint dabei aus horizontale Vouten oder vertikalen Nischen, was unverwechselbare, einmalige Wirkungen erzielen kann und daher immer mehr zur Anwendung kommt.

8.5. Schienen-Strahler

Schienen-Strahler finden hauptsächlich bei der Shop-Beleuchtung ihren Einsatz, da man mit ihnen durch Neuausrichtung der Strahler oder Veränderung ihrer Anzahl sehr leicht auf veränderte Beleuchtungsanforderungen reagieren kann. Am Häufigsten werden Hochvolt-Systeme verwendet, z.B. die 3-Phasenschiene, die in 3 Segmente aufgeteilt schaltbar ist. Hochvolt-Schienenstrahler erfordern im

8. LED-Lampen und -Leuchten



Abbildung 8.41.: Wallwasher-Leuchte (li) u. eingebaute Effektleuchten

Gegensatz zu den 12-Systemen ein eigenes Vorschaltgerät für jeden Strahler, sind dafür aber über große Längen problemlos einsetzbar. 12-Volt-Schienensysteme sind nur für kurze Längen zu empfehlen, da sonst die Leistung der entfernten Leuchten wegen des gestiegenen Widerstandes deutlich abnimmt. Hier müssen alle Kontakte fest sitzen, sonst kommt es wegen der höheren Ströme schnell zu Funkenbildung. Konventionelle Schienen-Strahler wurden regelmäßig mit Metall-halogendampf-Lampen betrieben, LED-Spots arbeiten, wie fast alle leistungsfähigen kleinen Strahler mit COB-Chips. Der Formenvielfalt sind auch hier nur technische Grenzen gesetzt. Je nach eingesetztem Vorschaltgerät sind die Strahler in den jeweiligen Segmenten mit Phasenabschrittdimmer ansteuerbar oder bei Dali-fähigen Konvertern auch in Gruppen bequem ansteuerbar.



Abbildung 8.42.: LED-Strahler für 3-Phasen-Schienen

8.6. Flutlichtstrahler und Straßenbeleuchtung

Sehr früh waren gerade asiatische LED-Leuchtenhersteller am Thema Straßen- und Außenbeleuchtung dran. Sie hatten das mengenmäßig große Potential bzw. den riesigen Bedarf Energie-sparender Beleuchtung der Öffentlichen Haushalte und die damit hoffentlich erzielbaren Gewinne geahnt. Unterschätzt haben sie die normativen Qualitäts-Anforderungen deutscher Behörden und entsprechend hierzulande bis heute so gut wie nichts verkauft. Mit steigender Effizienz der LED verbessern sich die Bedingungen für die Hersteller leistungsstarker LED-Leuchten, da damit gleichzeitig die Leuchten bei gleicher Wärmeleistung mehr Licht produzieren und somit relativ leichter werden.

Es werden zwei unterschiedliche Konzepte eingesetzt, viel LED-Licht zu erzeugen und dennoch die erforderliche Kühlung zu gewährleisten: beim ersten, das insbesondere auch für die Straßenbeleuchtung eingesetzt wird, werden viele leuchtstarke Powerchips in gewissem Abstand zueinander platziert, damit sich die Wärme zwischen den LEDs nicht staut. Das hat den spezifischen Nachteil, dass die Leuchtfäche damit entsprechend relativ groß wird. Über jeden der Powerchips wird z.B. eine Linse bzw. ein Kollimator gesetzt, der die gewünschten Lichtwinkel und Lichtverteilungen bestimmt. Bei Straßenleuchten sorgen spezielle Optiken für die gezielte Verteilung der Ausleuchtung eines definierten Bereichs im insgesamt asymmetrischen Lichtkegel.



Abbildung 8.43.: LED Flutlichtstrahler fixe und modulare Bauweise

Bei der zweiten Variante wird auf engem Raum mit großen COB-Chips gearbeitet, die einen mächtigen Kühlkörper erfordern, der die Abwärme sehr schnell abführen kann. Großflächige COB-Chips haben selten Linsen- und Kollimator-Optiken, da eine entsprechend nötige Größe der Optik optische Nachteile und höhere Kosten, mit sich bringt. COB-Fluter werden daher meist nur mit Reflektoren und

8. LED-Lampen und -Leuchten

einem gehärteten Lichtglas zum Schutz ausgerüstet. Günstige COB-Fluter mit COB-Optiken neigen zur Erzeugung von Spektralfarben und Falschfarben. Gute Straßenleuchten haben Elektronik zur Lichtmessung, zur intelligenten Ansteuerung und zum Wärmemanagement verbaut und sind schon wegen ihrer Größe und Leistungskraft relativ teuer.



Abbildung 8.44.: LED-Flutlicht mit COB-Chip, mit u. ohne Optik

Leistungsstarke Flutlichtstrahler gibt es relativ günstig aus China, viele versagen leider viel zu bald. Der Ausfall gründet sich nicht nur auf einen mangelhaften LED_COB, sondern durch verfrühten Schadensfall minderwertiger No-Name-Konverter oder oft auch durch Undichtigkeit bei Kabelauslässen oder Gehäusedichtungen und entsprechendem Schaden durch Wassereintritt.

Mittlerweile geht bei hochwertigen Strahlern der ersten Variante der Trend Richtung modulare Bauweise: bei höherer Leistungsanforderung werden einfach entsprechend mehr LED-Module miteinander verbaut. Noch sind den LED-Strahlern in Puncto Leistung gewisse Grenzen gesetzt. Weil ein konventionelles Metallhalogendampf-Leuchtmittel mit 2000 Watt Leistung aus technischen Gründen kaum größer als ein leistungsschwächeres sein muss, erhöht sich das Gewicht des stärkeren Flutlichts i.d.R. nur wegen der größer dimensionierten Reflektoren für einen größeren Lichtkegel. Bei LED-Strahlern mit entsprechend größerer Leistung fällt die Leistungszunahme aber durch entsprechende Zunahme der benötigten Heatsink-Fläche fast proportional ins Gewicht. Aktuell gibt es zwar LED-Fluter mit 400 Watt und mehr am Markt, deren Größe und entsprechendes Gewicht durch das verbaute Aluminium verhindert aber einen oft vom Kunden gewünschten eins zu eins Austausch konventioneller Beleuchtung.

Die Wünsche einiger Betreiber von Tennisplatz-Außenanlagen, durch Austausch

8.7. High Bay und Low Bay für Hallenbeleuchtung

der Strahler Geld zu sparen mussten so bisher leider zurückgewiesen werden, da die alten Lichtmasten für die neuen Belastungen der erforderlichen LED-Anlage nicht konzipiert sind und somit zusätzlich hohe Investitionen für neue Masten zu tätigen wären. Neben dem Gewicht erhöht sich mit leistungsstärkeren LED-Flutern durch die vergrößerte Leuchtenfläche auch die Empfindlichkeit gegen Winddruck, was die bestehenden Geometrien der Fluter Befestigung oft nicht aushalten.

8.7. High Bay und Low Bay für Hallenbeleuchtung

Industrie- und Gewerbehallen mit ihren relativ hohen Decken benötigen aus Sicherheitsgründen die vom Gesetzgeber geforderte leuchtstarke Grundbeleuchtung, damit Arbeitsunfälle vermieden werden und Berufsgenossenschaften und andere Versicherungen nicht die Leistung verweigern. Eine Hallenleuchte für die Befestigung an hohen Decken wird im Englischen High Bay genannt, bei relativ niedrigeren Hallen spricht man von Low Bay lighting. Die Nachfrage nach Kosten-einsparender LED-Beleuchtung ist zumindest im Potential groß, wird aber von den hohen Investitionskosten und der Unsicherheit über die Geschwindigkeit des technologischen Fortschritts bzgl. weiterer Effizienzverbesserung bei der LED gebremst. Auch in diesem Segment waren die Chinesen die ersten, die versucht haben mit relativ preisgünstigen Hallenleuchten schnell den Markt zu erobern. Veraltetes Design und fehlende Zertifikate wirkten aber bis heute abschreckend auf die Kunden, die anscheinend die Umrüstung noch abwarten, in der Hoffnung, dass technisch hochwertigere Leuchten bald zu besseren Preisen angeboten werden.

Inzwischen gibt es sehr hochwertige Leuchten aus Europa und Amerika, die den hohen Erwartungen hierzulande von technischer und qualitativer Seite her voll genügen, aber eben entsprechend ihren Preis haben. Einige erreichen über 40 Tausen Lumen und ersetzen so auch die stärksten konventionellen Strahler.

8.8. Lichtband-Systemleuchten

Die Hallenstrahler sind mehr oder weniger für großflächige Beleuchtungsaufgaben ausgelegt. Mit der Überschneidung ihrer kreisförmigen Lichtkegel wird eine möglichst homogene Ausleuchtung einer größeren Fläche angestrebt. Wer aber eher Wege und Gänge beleuchten will, wie sie z.B. in großen modernen Hochregallagern und Logistikzentren vorkommen, benötigt andere, spezifischere Lösungen. Hier ist die zu beleuchtende Fläche eher bandartig, also relativ schmal im Verhältnis zu ihrer Länge.

8. LED-Lampen und -Leuchten



Abbildung 8.45.: Hallenleuchten sog. (Low-)High-Bays (oben li China-Design)

Deshalb sind spezielle, leistungsstarke Langfeldleuchten / Lichtband-Leuchten gefragt, deren Optik auf diese asymmetrische Anforderung ausgerichtet ist, damit eine hohe Effizienz erreicht wird und auch genügend Licht bei hohen Deckenhöhen am Boden ankommt. Die Lichtband-Systeme müssen dazu nicht unbedingt durchgängig sein, je nach Optik kann auch entsprechend mit Abständen zwischen den einzelnen Leuchten zueinander gearbeitet werden. Das Licht einiger LEDs, die sich jeweils an den Enden der Langfeldleuchte befinden, wird dazu entsprechend durch asymmetrische Ausrichtung auf die Fläche unter den Leuchten-Zwischenräumen ausgerichtet.

Diese Aufgabe ist ohne hochwertige, auf die Leuchte zugeschnittene Optiken kaum zu lösen, weitere Anforderungen wie Blendfreiheit und IP-Schutz kommen hier dazu. Gute Leuchten für Lichtband-Systeme haben optional das Vorschaltgerät verbaut, sind für den 230V-Anschluss mit kaskadierbaren Systemen ausgestattet und besitzen eine eingebaute Intelligenz für Dimm-Anforderungen, wie sie im Zusammenspiel mit einer Tageslichtsteuerung auftreten. Die Lichtbänder werden oft an Seilsystemen abgehängt, damit bleibt man von der Form bzw. Gestaltung der Decke unabhängig, erreicht ein gleichmäßiges Höhenniveau für die Einhaltung definierter Beleuchtungswerte.

Einige Hersteller haben intelligente LED-Systemleuchten im Angebot, wo sich

8.8. Lichtband-Systemleuchten

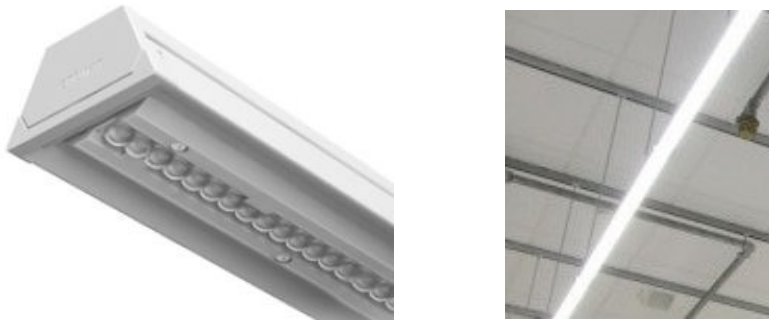


Abbildung 8.46.: LED-Lichtband für Hallenwege und Flure

mit relativ wenig Montage-Aufwand bei bestehenden Lichtband-Röhrenleuchten bzw. unter Verwendung des alten Trägers die Leuchten tauschen lassen. Das ist vielleicht für eine Vielzahl von bestehenden Beleuchtungsanlagen interessant, wie sie in Produktionshallen, Supermärkten und Lagergebäuden installiert sind.

Kapitel 9

LEDs für besondere Anwendungen

9.1. LEDs in Displays der Unterhaltungsgeräte und Telekommunikationsindustrie

Neben der Allgemeinbeleuchtung baut auch die Unterhaltungsgeräte-Industrie bei Geräten mit Bildschirmen auf die LED-Technik. Die LEDs bieten viele Vorteile gegenüber den alten Leuchtstoffröhren und werden daher in alle neuen Geräte mit LCD-Technik verbaut: sie schalten schneller von hell auf Dunkel, verbrauchen weniger Energie, erzeugen so weniger Abwärme, leben länger und ermöglichen kompaktere Abmessungen der Bildschirme, besonders hinsichtlich flacher Bauweise. Die technische Weiterentwicklung zielt auf den Einsatz von RGB-LEDs zur Farbrunterstützung der Flüssigkristalle und auf noch bessere Kontrastverhältnisse, mittels lichtlenkenden Folien dank Nano- und Quantentpunkt-Technologie. Der Wettlauf geht jetzt gegen die Schwestertechnologie „OLED“, die bisher nur bei kleinflächigen Displays eingesetzt wird. Man kann gespannt sein, welche technischen Impulse dabei entstehen und wie sie sich auf die LED-Technik aus dem Bereich Allgemeinbeleuchtung auswirken.

9.2. Große LED-Displays für Werbung und Information

Bei Osram in München stehen seit einigen Jahren mehrere großformatige Stelenförmige Displays aus unzählig nebeneinander und ähnlich flächig wie bei einem Fernseher angeordneten LEDs, die jedem vorbeifahrenden Autofahrer auch hierzulande deutlich machen, wozu LEDs in großer Anzahl gruppiert fähig sind. Diese Technik wird für großflächige LED-Displays-Boards eingesetzt, wie sie in anderen EU-Ländern, Amerika und Asien für großflächige Außenwerbung sehr gebräuchlich sind. Da jede LED separat angesteuert werden kann, erfolgt der Bildaufbau, ähnlich wie bei einem Fernseher, mit vielen Pixeln. Die entsprechend geringere Größenbedingte Auflösung der LED wird bei entsprechender Größe des Displays dennoch

9.3. Kfz-Beleuchtung

erreicht. Auch bei kleineren Formaten wird sie durch die relative Entfernung zum Betrachter nicht zum Problem, so dass der Effekt und die Kostenersparnis durch den geringen Strom-Verbrauch den Erfolg ausmachen.



Abbildung 9.1.: 25 Meter-Stadion-Display in LED-Technik Fa. Mitsubishi

9.3. Kfz-Beleuchtung

Auch die Autoindustrie treibt die LED-Entwicklung mit voran. Während für den Innenbereich (Interior-Lighting) kaum spezielle neue Konzepte benötigt werden, war der Einsatz für die Außenlichter wie Blinker, Brems- und vor allem fürs Fahrlicht stets eine echte Herausforderung für die Entwickler im Automotive Sektor. Inzwischen existieren die ersten Fahrzeuge, die komplett mit LEDs arbeiten. Die letzte Herausforderung, das ausreichend leuchtstarke Abblend- und Fernlicht scheint technisch gelöst zu sein, seit 2008 werden Serien-Fahrzeuge mit LED-Abblendlicht ausgestattet. Alternativ zu LEDs bei Hauptscheinwerfern arbeitet die Industrie an Laser-basierten Lösungen. Als Zwischenschritt rüsteten die Fahrzeughersteller ihre Autos ab 2004 mit LED-Tages-Fahrlicht aus, was weniger hell ist als das Nacht-taugliche Abblendlicht. Audi machte mit seiner geschwungenen Form dabei

9. LEDs für besondere Anwendungen

wenigstens für kurze Zeit wegweisende Vorgaben für andere Designer und die LED damit hoffähig für den teilweise skeptischen Endkunden. Tagesfahrlicht, das die Batterie schont und zur Fahrsicherheit beiträgt hat gute Chancen, Standard für die Zukunft zu werden, in der Schweiz ist es seit 2014 Pflicht. Es trägt durch die Design-Form der LEDs zur Markenerkennung des Autos bei, daher kann es oft vom Fahrer gar nicht abgeschaltet werden.

Auch ich habe die Hoffnung, dass das wirklich nervige und Zeit-aufwändige Auswechseln der meist völlig unzugänglich verbauten Scheinwerfer-Birnen bald der Vergangenheit angehört, die Fahrzeugbeleuchtung wirklich wartungsfrei wird und verstellte, blendende Autoscheinwerfer Geschichte werden.

9.4. Beleuchtung im Transportbereich etc.

Die Hersteller von Zügen, Straßen- und U-Bahnen sind, genauso wie Flugzeugbauer auch, an langlebiger Beleuchtung interessiert, die möglichst wenig Energie verbraucht und wartungsarm ist. Für Bahnanwendungen ist auch die relative Unempfindlichkeit der LED gegen Stoß und Vibration interessant. Der Einzug der LED-Technik hat daher auch hier längst begonnen, wobei teilweise auf die jüngsten Erfahrungen aus dem Automotive-Bereich zurückgegriffen werden. Die LED ist für sicherheitsrelevante Beleuchtungsaufgaben geradezu prädestiniert, man denke z.B. an platzsparende Gang- und Trittstufenbeleuchtung, Hinweisschilder, etc.. Für diese sensiblen und technisch anspruchsvollen Anwendungsgebiete steht die Produktsicherheit und Einhaltung von relevanten Bestimmungen im Vordergrund, weshalb die Entwicklung spezieller Leuchten in diesem Segment generell etwas länger dauert als in anderen Anwendungsbereichen.

Interessanterweise ist man hier in den USA ausnahmsweise Europa einen Schritt voraus, was sehr wahrscheinlich auf die besonderen Attraktivität-Anstrengungen der Railway-Betreiber zurückgeführt werden kann, Kunden zu überzeugen, vom Auto auf die Nahverkehrs-Bahn umzusteigen. Auch bei uns wird im Bahn- und Busbereich mehr Augenmerk auf ein modernes und gefälliges Ambiente gelegt, das zwar äußerst funktionell aber dennoch für den Fahrgast ansprechend sein soll, damit er sich bei seiner Fahrt wohl fühlt. Im Bereich Grundbeleuchtung entstehen durch die LED mehr Gestaltungsfreiheiten, da die Leuchten nicht mehr für den Leuchtmittelaustausch zugänglich sein müssen, flächiges Licht und Lichtstreifen kein Problem darstellen.

Kapitel 10

Die Zukunft der LED

In den wenigen Jahren seit meinem Einstieg 2007 in die LED-Welt hat sich in der Branche sehr sehr viel getan und die ursprüngliche Gründerstimmung ist einem fast nüchternen, Tech-Business gewichen. Alle bedeutenden Lampen- und Leuchtenhersteller sind mittlerweile LED-mäßig up-to-date. Sie nutzen ihre mächtige Marktposition und ihre Bekanntheit für den erfolgreichen Vertrieb. So setzt allmählich der von von früher her bekannte Verdrängungs-Wettbewerb in der Beleuchtungsbranche wieder ein, bei dem es kleine Anbieter bald wieder sehr schwer haben werden, gegen die Platzhirsche zu punkten. Die Wiederverkäufer von zweifelhafter China-Ware haben inzwischen auch ihr Lehrgeld gezahlt. Viele der günstigen Produkte haben sich, entgegen der vollmundigen Versprechen von einhunderttausend Betriebsstunden, wegen technischer Unzulänglichkeiten im technischen Design, viel zu schnell als Totalausfall herausgestellt. Der Trend geht also Richtung Qualität, zu unglaublich günstigen Preisen natürlich.

Die LED wird ihren Siegeszug noch schneller fortsetzen, da die Effizienz weiterhin durch technische Innovationen steigt und die Herstellungskosten noch sinken. Laut einer Studie von McKinsey beträgt der Preisverfall 10-20% pro Jahr. Die drei Bereiche, in denen die LED effizienter werden kann sind die Interne/externe Quanteneffizienz, das Heatmanagement und die Phosphore. Aktuell werden bei der neuesten LED-Generation schon Werte von 140-160 lm/w erreicht, das ist das Doppelte wie noch vor 5-6 Jahren. McKinsey sagt für den Bereich der Allgemeinbeleuchtung in 2016 eine Marktdurchdringung der LED von insgesamt 45%, für 2020 bereits 69% voraus.

Ein weiteres Feld liegt in der Leuchte selbst, deren technisches Design die LED noch mehr unterstützen muss, die erzeugten Lumen auch effektiv und zielgerichtet nach außen zu bringen. Das Potential der LED für intelligente Möglichkeiten der Ansteuerung ist noch lange nicht ausgeschöpft. In diesem Bereich bilden sich aus dem teilweise chaotisch anmutenden Allerlei der letzten Jahre erste Standards

10. Die Zukunft der LED

heraus, die von Konsortien aus Unternehmen der Elektronikbranche vorangetrieben werden, damit letztere Planungssicherheit bezüglich ihrer Produkte schaffen. Ich stelle mir vor, dass in Zukunft noch viel mehr mit Mikroprozessortechnik gearbeitet wird und diese teilweise schon „On Board“ auf dem LED-Chip sitzen wird und mit diversen externen Steuereinheiten, z.B. via Bus-System oder durch ein in der Stromversorgung hinterlegtes Signal kommuniziert. Auch die vernetzte Kommunikation von Leuchten untereinander dürfte sich bald durchsetzen. Optische Systeme zur Lichtlenkung sind insbesondere im Bereich gewerblicher Beleuchtung ein Muss, denn die beste LED-Effizienz nützt wenig, wenn das Licht nicht genau dort auftrifft, wo es hin soll. Die Fortschritte, die im Bereich LED-optimierter Kollimatoren, Linsen und Reflektoren erzielt wurden und noch werden können mit steigenden Produktionszahlen auch für Leuchten im mittleren und unteren Preissegment zum Einsatz kommen, die Qualität des Lichts erhöht sich.

10.1. Trends in der Allgemeinbeleuchtung

Beleuchtung wird in naher Zukunft sicher einerseits noch mehr Design bedeuten und andererseits wird sie in naher Zukunft im funktionellen Bereich viel nahtloser in Räume integriert sein. Noch schöpft die LED ihr Potential dahingehend fast nicht aus, da die Beleuchtungsindustrie noch am Anfang einer Entwicklung steht, neue Designs aufgrund der gewachsenen technischen Möglichkeiten einzuführen. Da sich das Rad der Technik immer schneller dreht werden die Produkt- und Designzyklen entsprechend kürzer. Dies steht interessanterweise voll im Widerspruch zur grundsätzlichen Langlebigkeit der LED an sich.

Betrachten wir zunächst den privaten Bereich: Die unglaubliche Vielzahl an existierenden Leuchtenformen für die konventionelle Technik muss mit der neuen LED-Technologie nicht zurückgehen, das Gegenteil klingt eher plausibel. Es werden sich andere, neue Grundformen herausbilden, die den Erfordernissen und Möglichkeiten der LED-Technik Rechnung tragen. Der Trend beim Wohnen geht weiterhin sichtbar Richtung Individualisierung, Komfort und auch Exklusivität. Den meisten privaten Endkunden wird es wohl gar nicht so wichtig sein, welche Technologie hinter der Beleuchtungslösung steckt. Eher bleibt von Interesse, was die aktuelle Technik bezüglich Funktionalität und Bedienkomfort zu leisten vermag und was sie in der Anschaffung und dem Unterhalt kostet. Die aktuelle Generation junger Menschen im heiratsfähigen Alter ist den Umgang mit Computern und computerisierten Alltagsgeräten von Beginn an gewohnt und wird sicher keine Probleme damit haben, wenn auch in die Jedermanns-Beleuchtungstechnik endlich etwas Intelligenz Einzug hält, vorausgesetzt, dass die Bedienbarkeit gewährleistet bleibt. Die ältere Genera-

10.1. Trends in der Allgemeinbeleuchtung

tion lebt im Gegensatz dazu mit dem angewohnten bescheidenen Anspruch, dass Leuchten vor allem zweckmäßig sein müssen. Auch ich gehöre zugegeben noch zu der Generation, die fast instinktiv das Licht abends im Flur und den nicht genutzten Zimmern schnell löscht, um Strom zu sparen...

Im Bereich der gewerblichen und öffentlichen Beleuchtung spielen schon jetzt normative Vorgaben zur Effizienz, Kostenersparnis und Sicherheit die Hauptrollen bei der Entscheidung für oder wider bestimmte Technologien. Wenn man sich vor Augen führt, wie viele Millionen Leuchtstoffröhren heutzutage für Licht sorgen und dabei hohe Wartungskosten für den Austausch verursachen, kann man sich vorstellen, dass sich langlebige LED-Leuchten in diesem Bereich durchsetzen werden. Der einzige, dem dies nicht so schmeckt wird derjenige sein, der vom Leuchtmittelwechsel lebt.. Insgesamt gesehen ist der Bedarf an qualitativ vernünftigen LED-Leuchten garantiert gewaltig. Gerade hat die englische Hauptstadt London ihre Ambitionen bekanntgegeben, die komplette öffentliche Beleuchtung auf Energie sparende LED-Technik umzustellen. Auch wenn das nicht von heute auf morgen passieren wird, gibt es doch unzählige Gemeinden mit identischen Problemen. Mit der dazu nötigen Massenproduktion werden zum Nutzen aller insgesamt die Preise noch weiter fallen.

Projekte dieser Größenordnung werden stets über Ausschreibungen vergeben. Diese besitzen eine nach außen hin unsichtbare, System-immanente Vergabelogik, wo oft nicht das ideale Produkt gewinnt, sondern durch Trickserien schon im Vorfeld feststeht, wer den Fisch an Land ziehen wird. Daher kann leider auch durch solche Großprojekte nicht mit einer daraus resultierenden evolutionären Produktentwicklung gerechnet werden. In der Vergangenheit haben die großen Player der Beleuchtungsbranche mit großem Erfolg alles in ihrer Macht stehende getan, um ihren Produkten Marktvorteile zu schaffen und konkurrierende Anbieter wegzudrücken. Irgendwie muss das auch mit unserer deutschen Mentalität zusammenhängen: Wo Philips oder Osram draufsteht wird gar nicht mehr lange gefragt, welche Leistungsparameter geboten werden. Ist der Markenname aber unbekannt, bleibt es auch mit den überzeugendsten Argumenten schwer, so ein Produkt an den Mann zu bringen. In Amerika wird das entspannter und zielorientierter gehandhabt, der eigene Vorteil steht im Vordergrund und so bekommen auch wenig bekannte Anbieter die Chance zu überzeugen.

Wie könnte sich die chinesische LED- und Leuchten-Industrie entwickeln?

Aktuell wird die fast bedingungslos wirkende staatliche Unterstützung für LED-Hersteller drastisch zurückgefahren, was zu einer Konsolidierung auf der Herstellersei-

10. Die Zukunft der LED

te und einem Ende des Überangebotes technisch überholter Billig-Chips führen wird. Die generelle Absatzkrise der chinesischen Wirtschaft in 2016 zeigt sich natürlich auch im Beleuchtungsexport nach Europa. Ich denke aber, China wird höchst wahrscheinlich auch in naher Zukunft seine wirtschaftlichen Vorteile ausspielen und weiterhin das untere Preissegment in den Bereichen LEDs und LED-Leuchten beherrschen. Forschung und Qualitätsmanagement werden wachsen, und die steigenden Lohnkosten führen dann wie überall zu einem höheren Grad an maschineller Fertigung, was China wiederum für europäische Qualitätsanforderungen noch interessanter machen wird. Als Fertigungsstandort von chinesischen Auftragsfertigern für europäische Konzerne der Beleuchtungsindustrie wird China bald auch neben billigen Produkten auch einen noch größeren Teil der hochwertig konzipierten Leuchten nach Europa liefern und die EU-heimische Produktion damit in einigen Bereichen beerdigen.

Was steht jetzt schon an Innovationen in den Startlöchern? In 2013 ist mir ein wirklich innovatives Produkt aufgefallen: Der Hersteller, ein kanadisches Start-Up, umgeht das LED-Problem der Hitzeerzeugung damit, in dem er viele sehr kleine LEDs gleichmäßig auf eine dünne Folie flächig verteilt und mittels aufgedruckten Leiterbahnen Matrix-artig gemeinsam ansteuert. Damit erreicht er mit geringen Abständen zu einer streuenden Diffusor-Folie OLED-ähnliche Effekte, ohne einen echten Heatsink in Betracht ziehen zu müssen. Natürlich eignet sich dieses Licht nur für diffuse Beleuchtung, den Einsatzgebieten und Leuchtenformen sind aber wie bei der OLED damit kaum Grenzen gesetzt. Ich bin gespannt, ob das Preisproblem durch die hohe Anzahl der verbauten LEDs so gelöst werden kann, dass die Idee in größerem Stil Anwendungen und auch Käufer findet.

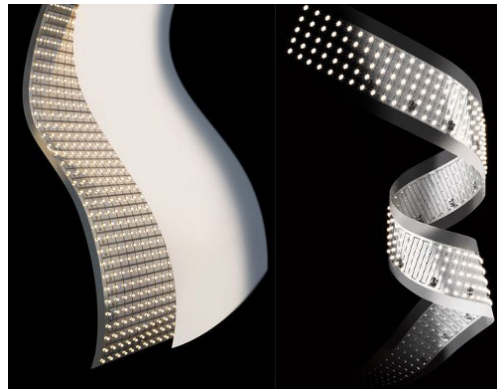


Abbildung 10.1.: Flexible LED-Engine Fa. Cooledge

10.2. Was unterscheidet OLED und LED?

In Amerika, so liest man zumindest in vielen Medien, soll ein Comeback der Glühlampe vorbereitet werden. MIT und weitere Universitäten forschen an der Effizienzsteigerung der Glühlampen-Technologie: mit Hilfe einer Nano-Beschichtung um den konventionellen Wolframdraht soll die Hitze im Glühfaden gefangen werden, so dass statt Infrarotstrahlung nur Strahlung im sichtbaren Bereich emittiert und somit die Effizienz drastisch gesteigert werden würde. Ich bin skeptisch, ob diese Idee letztlich dazu führen wird, dass Glühfadenlampen, so wie von den Medien vorhergesagt (-gesehnt?) wieder einen nennenswerten Marktanteil bekommen... Zu viele Variable bestimmen den Erfolg oder Misserfolg einer Technologie. Die mediale Begeisterung zeigt aber deutlich, dass die Skepsis gegenüber der komplexen LED-Technologie bei vielen Menschen weiterbesteht. Ich könnte mir aber vorstellen, dass diese Technologie für bestimmte Anwendungen durchaus interessant ist.

Ob die OLED-Technologie die LED in naher Zukunft von flächigen Beleuchtungsaufgaben verdrängen wird oder auch nicht, ist derzeit in der Lichtbranche noch kein Thema von vordringlicher strategischer Bedeutung. Theoretisch könnte auch eine andere Technologie, wie z.B. das viel versprechende Graphen irgendwann Verwendung finden, das ist jetzt aber sicher noch Zukunftsmusik. Für die nahe Zukunft reicht das Potential der LED jedenfalls vollkommen aus, um mit dieser Technik ein neues Zeitalter in der Beleuchtung einzuleiten.

10.2. Was unterscheidet OLED und LED?

Das „O“ vor der LED steht für „organisch“, einem Begriff aus der Chemie der für Kohlenstoff-haltige Verbindungen wie Farben oder Kunststoffe verwendet wird. Es handelt sich also um einen Halbleiter der nicht mit anorganischen, ein-kristallinen Elementen wie bei der LED realisiert wird, sondern durch viele kleine funktionelle Schichten für Kathode, Farbschichten, elektrisch leitender Kunststoff, Anode, ...

Die Verwendung einer sehr dünnen Glasschicht/-Folie als Trägermaterial bewirkt mechanisch-physikalische Vorteile bei der Haltbarkeit gegenüber den voll flexiblen OLEDs (PLED), wo auch der Träger aus Kunststoff ist. Für viele Anwendungen wird das Glas, weil es spröde ist, aber eher ungeeignet bleiben. Es gib derzeit zwei prinzipiell unterschiedliche Herstellungsverfahren. Beim ersten wird unter Vakuum jeweils eine Nanometer dünne funktionelle Schicht aufgedampft, was hauptsächlich für die Glas-basierten OLEDs zum Einsatz kommt, beim zweiten erfolgen die Aufträge nasschemisch, d.h. im Druckverfahren. Das Bedrucken birgt zwar noch Ungenauigkeiten und somit Fehlerquellen, ist aber preislich konkurrenzlos.

10. Die Zukunft der LED

Die OLED ist grundsätzlich für flächige Beleuchtung ausgelegt. Im Vergleich zur LED besitzt sie eine wesentlich geringere Leuchtdichte, die ungefähr bis zur Blendungsgrenze reicht und wird mit entsprechend weniger Strom angesteuert. Sie benötigt i.d.R. keinen extra Heatsink, die entstehende Wärme wird über die gesamte Oberfläche abgestrahlt, wobei die Effizienz derzeit bei 60 lm/w liegt. Die OLED arbeitet jedoch mit einer hohen internen Quanteneffizienz, d.h. viel des erzeugten Lichts verlässt die OLED auch verlustfrei.

Ihr Erfolg im Bereich der Bildschirmtechnik liegt daran, dass ein OLED-Display im Gegensatz zum LCD-Flüssigkeitskristall-Bildschirm keine zusätzliche Leuchtquelle braucht, die die bildgebenden Flüssigkeitskristalle von hinten beleuchten, sondern selbst zugleich Farbe und Licht erzeugt. Die Dicke einer OLED kann weniger als einen Millimeter betragen, wodurch man derzeit schon Bildschirm-Bautiefen von 3 mm erreicht. Sie reagiert ca. tausend mal schneller als jedes LCD, mit weit besseren Kontrast-Verhältnissen und bietet auch aus sehr flachen Betrachtungswinkeln klare Farben und Kontraste für ein scharfes Bild. In teuren Mobiltelefonen (AMOLED+ Displays) wird die OLED heute schon erfolgreich eingesetzt.

Der Nachteil der OLED ist derzeit der sehr hohe Preis und die relativ geringere Lebensdauer, die aktuell bei der Glas-Variante bei rund 15000 Stunden liegt und in der PLED-Variante deutlich weniger beträgt, was an der Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit und Luftsauerstoff liegt. Weil die Vorteile für flächige und dünnste Beleuchtung aber auf der Hand liegen, forscht nicht nur die Unterhaltungsgeräte- und Beleuchtungsindustrie daran, sondern auch Chemieriesen wie DuPont und Merck und große Druckerhersteller. Selbst wenn wenig nach außen durchdringt, passiert sehr viel im Bereich der Forschung und Entwicklung für Massenproduktionstaugliche OLED-Produkte. So ist es bereits gelungen teure Materialien, wie die auch bei der LED eingesetzten seltenen Erden, durch günstigere wie Kupfer voll zu ersetzen und durch Modifikation von Schichtaufbau, Farbstoffen und Kunststoffen längere Lebenszeiten zu erreichen.

Philips, Osram und einige andere Leuchtenhersteller haben bereits OLED-Prototypen für Leuchten präsentiert. Von Osram gibt es bereits seit längerem kleine OLED-Module auf Glas-Substrat-Basis für jedermann zu kaufen, die allerdings noch relativ kostspielig sind. Wenn es gelingen sollte, die OLED günstig, robust und wirklich großflächig herzustellen, was sehr wahrscheinlich erscheint, wird ihr Siegeszug nicht aufzuhalten sein. Vielleicht kann man damit eines Tages in jedem Heim die „echte Fototapete“ realisieren...

Anhang A

Meine eigene LED-Story

Wie kommt man zu LEDs? In meinem Fall müsste man umgekehrt fragen, wie kam die LED zu mir?

Im Jahr 2007 infizierte mich mein Freund Gerhard mit seiner überschäumenden Begeisterung für LEDs. Er gründete in Kalifornien ein Start-Up, um seine schon länger reifenden Ideen hinsichtlich eines intelligenteren Designs von LED-Leuchten in die Tat, bzw. in Produkte umzusetzen. Sein Enthusiasmus bezüglich der vielen Möglichkeiten LEDs geschickt einzusetzen hatte mich tief beeindruckt, aller spätestens, als ich die ersten Ergebnisse seiner Entwicklungsarbeit demonstriert bekam. Schnell war für mich dann klar, dass dieses Thema auch mein Ding ist, ich den Elan dieser Gründerstimmung mittragen wollte, in dem ich mich auch intensiv mit diesem neuen Kosmos beschäftigte. Gerhard, der sein ganzes Berufsleben bis dato in der Halbleiterbranche verbracht hatte und zuletzt bei einem amerikanischen Saphir-Wafer Hersteller für LEDs im globalen Vertrieb angestellt war, war sozusagen Zeitzeuge der technischen Entwicklung der (weißen) LED, da er allen großen Herstellern die begehrten Saphir-Wafer verkaufte. Ich meinerseits hatte weder diese einschlägigen Weihen der LED- oder Halbleiter-Branche, noch seine einschlägige Ingenieurausbildung. So stützte ich mich notgedrungen auf meine große Neugier, meine ganz gute Allgemeinbildung und mein handwerklich-technisches Geschick, um als Rookie möglichst bald mitreden zu können. Durch viel Nachfragen und Nachlesen versuchte ich den anfangs relativ steinigen und von Versuch und Irrtum gekennzeichneten Weg möglichst rasch für mich einzuebnen. Das hat wohl trotz zunächst vieler kleiner Misserfolge geklappt...

Das Unternehmen startete mit guten Ideen, einem ersten Produkt und ganz dem Silicon-Valley-Klischee entsprechend in Gerhards Garage. Dort bauten wir uns zunächst eine große Ulbricht-Kugel (Integrating-Sphere), um das doch immer recht augenscheinliche Verhalten von LEDs im Allgemeinen und von Gerhards Ideen im

A. Meine eigene LED-Story

Besonderen mit belastbaren Zahlen zu verifizieren. Das Ding gelang auf den zweiten Versuch und so konnten wir dann tatsächlich die Leistungsfähigkeit der ersten von Gerhard selbst entworfenen LED-Module testen und diese mit anderen am Markt erhältlichen Produkten der Mitbewerber hinsichtlich Leuchtkraft (Lumen-output) und Effizienz zu vergleichen. Für das bessere Verständnis des oft seltsamen, unvorhersagbaren Verhaltens von Trafos, Konvertern und Dimmern wurde dann noch ein altes, gebrauchtes, analoges Oszilloskop angeschafft, das auch Elektronik-Neulingen wie mir schön bildlich gemacht hat, was mit dem Strom beim Transformieren oder Dimmen passiert, bzw. wann er die LED zum unerwünschten Flackern bringen kann. Auch heute noch kann ich nur jeden dazu ermutigen, vieles was nicht vom Kopf her sofort verstanden wird, einfach gezielt auszuprobieren, wie ein Forscher systematisch zu testen und sich dabei möglichst die Arbeit mit verfügbaren technischen Hilfsmitteln zu erleichtern.

Wie ging die Geschichte in Kalifornien weiter? Gerhard fokussierte sich auf LED-Leuchten, die es seinerzeit in dieser Lichtqualität und Bedienkomfort noch nicht auf dem Markt gab und eroberte sich damit schnell die Gunst der lokalen Licht-Architekten und ihrer gehobenen Kundschaft in der Bay-Area rund um San Francisco. Überraschend bald tauchten dann aber auch schon erste Mitbewerberprodukte mit verblüffenden Design-Ähnlichkeiten auf, ein nicht ungewöhnliches und bekanntes Phänomen in der gesamten Beleuchtungsbranche... Mittlerweile haben sich insbesondere US-amerikanisch geführte Unternehmen eigene Ideen und manchmal sicher auch die von anderen, wie man LEDs klug baut, betreibt oder in schöne Leuchten einbaut, patentieren lassen. Beim Thema Patentschutz, der sehr teuer und zeitaufwändig ist, scheiden sich aber die Geister. Auch ich bin hier gespalten und so manche Idee, die mit diesen Patenten geschützt werden soll, beurteile ich jenseits von schützenswert, weil z.B. naheliegend und trivial, statt brillant oder genial. Patente haben ein spezielles Faszinosum, den Hauch von Genialität. Das passt ideal zu Aktionären von Großunternehmen oder Venture-Capital Investoren. Sie brauchen halt regelmäßig den Anschein einer innovativen Unternehmensentwicklung für die Beruhigung ihrer Nerven, solange noch keine aussagekräftigen Verkaufszahlen überzeugen können.

Im LED-Bereich hat diese oft ausufernde Patentwut, zumindest im Bereich der Herstellungstechnologie, letztlich aber auch zu einer Technologiebeschleunigung geführt, die die gängige Patentpolitik inzwischen faktisch selbst fast ad absurdum führt. Lediglich die Chinesen schaffen es anscheinend relativ unbeeindruckt, den Hickhack um Patente gelassen und unbekümmert links liegen zu lassen, trotz zahlreicher Verwicklungen darin. Wie auch immer... Gerhard lebt weiterhin seinen American Dream und sprüht auch heute immer noch voller neuer Ideen und versucht

nach wie vor mit deren raschen Umsetzung in neue Produkte, den Großen am Markt wenigstens kurzfristig eine Nasenlänge voraus zu bleiben.

Ich selbst beschäftigte mich hier in Deutschland die letzten Jahre mehr mit der Projektseite und relativ unabhängig von bestimmten Herstellern und Produkten. Das Wissen um die LED als Lichtquelle ist mir für gelungene Beleuchtungsprojekte dabei sehr hilfreich. Meine Begeisterung für die LED-Technik und ihr Potential ist bis heute groß geblieben. Ich bin sehr gespannt auf technische Weiterentwicklungen, lerne ständig bei meiner Arbeit noch dazu. Die dynamische Marktentwicklung erfordert, dass man immer flexibel bleibt und sein Tun gemäß der Erfahrung und wirtschaftlichen Notwendigkeiten anpasst. Somit bleibt die Zukunft spannend aber eben ungewiss...

So - jetzt wissen Sie viel aus meinem persönlichen LED-Leben und den Speichereinheiten in meinem Hirn, die sich mit dem für mich wunderbaren Thema LED befassen...

..und mir bleibt nur noch, mich für Ihr Interesse zu bedanken! Vielleicht sieht man sich ja mal und kann sich über interessante Themen austauschen!



Abbildung A.1.: Stephan Link

Anhang B

Urheberrecht

Das Manuskript war zwar relativ schnell von mir geschrieben - den Inhalt aber dann mit LaTeX in die Form zu bringen, die Sie hier vorfinden, war ein hartes Stück Arbeit, der Zeit-raubendste Part. Um selbst keine Urheberrechte zu verletzen, habe ich nahezu alle Graphiken selbst mit Inkscape erstellt. Die Abbildungen sind, sofern keine Herkunftsangabe vorliegt eigene. Hinsichtlich Urheberrechtlicher Gesichtspunkte bestimme ich lediglich folgende Einschränkungen zur Weiterverbreitung:

Für für alle Texte und Graphiken gilt folgende Creative Commons-Lizenz:

CC BY-NC-ND 4.0



Abbildung B.1.: Creative-Commons Lizenz

Die Lizenzbedingung besagt:

Sie dürfen das Buch teilen, das Material in jedwedem Format oder Medium vervielfältigen und weiterverbreiten. Aber nur *unter folgenden zwingenden Bedingungen*:

- Namensnennung: Nennung des Urhebers und Werkes
- Keine kommerzielle Nutzung: nur für unentgeltliche Fortbildung und Lehre
- Keine verändernde Bearbeitungen des Originals
- Keine weiteren Einschränkungen: Sie dürfen keine zusätzlichen Klauseln oder technische Verfahren einsetzen, die anderen Dritten rechtlich irgendetwas untersagen, was diese Lizenz erlaubt

Anhang C

Impressum

SW-Editor: $\text{\LaTeX}$

Autor: Stephan Link

eMail: LED@stephanlink.de

Ausgabe: Nr. 2.0, Januar 2016, im Selbstverlag

Legende									
Ordnungszahl	Name	Symbol	Ordnungszahl	Symbol	Ordnungszahl	Symbol	Ordnungszahl	Symbol	Ordnungszahl
1	H	Wasserstoff	1	H	Wasserstoff	1	H	Wasserstoff	1
2	He	Helium	2	He	Helium	2	He	Helium	2
3	Li	Lithium	3	Li	Lithium	3	Li	Lithium	3
4	Be	Beryllium	4	Be	Beryllium	4	Be	Beryllium	4
5	B	Bor	5	B	Bor	5	B	Bor	5
6	C	Kohlenstoff	6	C	Kohlenstoff	6	C	Kohlenstoff	6
7	N	Stickstoff	7	N	Stickstoff	7	N	Stickstoff	7
8	O	Sauerstoff	8	O	Sauerstoff	8	O	Sauerstoff	8
9	F	Fluor	9	F	Fluor	9	F	Fluor	9
10	Ne	Neon	10	Ne	Neon	10	Ne	Neon	10
11	Na	Natrium	11	Na	Natrium	11	Na	Natrium	11
12	Mg	Magnesium	12	Mg	Magnesium	12	Mg	Magnesium	12
13	Al	Aluminium	13	Al	Aluminium	13	Al	Aluminium	13
14	Si	Silicium	14	Si	Silicium	14	Si	Silicium	14
15	P	Phosphor	15	P	Phosphor	15	P	Phosphor	15
16	S	Schwefel	16	S	Schwefel	16	S	Schwefel	16
17	Cl	Chlor	17	Cl	Chlor	17	Cl	Chlor	17
18	Ar	Argon	18	Ar	Argon	18	Ar	Argon	18
19	K	Kalium	19	K	Kalium	19	K	Kalium	19
20	Ca	Calcium	20	Ca	Calcium	20	Ca	Calcium	20
21	Sc	Scandium	21	Sc	Scandium	21	Sc	Scandium	21
22	Ti	Titanium	22	Ti	Titanium	22	Ti	Titanium	22
23	V	Vanadium	23	V	Vanadium	23	V	Vanadium	23
24	Cr	Chrom	24	Cr	Chrom	24	Cr	Chrom	24
25	Mn	Mangan	25	Mn	Mangan	25	Mn	Mangan	25
26	Fe	Eisen	26	Fe	Eisen	26	Fe	Eisen	26
27	Co	Kobalt	27	Co	Kobalt	27	Co	Kobalt	27
28	Ni	Nickel	28	Ni	Nickel	28	Ni	Nickel	28
29	Cu	Kupfer	29	Cu	Kupfer	29	Cu	Kupfer	29
30	Zn	Zink	30	Zn	Zink	30	Zn	Zink	30
31	Ga	Gallium	31	Ga	Gallium	31	Ga	Gallium	31
32	Ge	Germanium	32	Ge	Germanium	32	Ge	Germanium	32
33	As	Arsen	33	As	Arsen	33	As	Arsen	33
34	Se	Selen	34	Se	Selen	34	Se	Selen	34
35	Br	Brom	35	Br	Brom	35	Br	Brom	35
36	Kr	Krypton	36	Kr	Krypton	36	Kr	Krypton	36
37	Rb	Rubidium	37	Rb	Rubidium	37	Rb	Rubidium	37
38	Sr	Strontium	38	Sr	Strontium	38	Sr	Strontium	38
39	Y	Yttrium	39	Y	Yttrium	39	Y	Yttrium	39
40	Zr	Zirkon	40	Zr	Zirkon	40	Zr	Zirkon	40
41	Nb	Niob	41	Nb	Niob	41	Nb	Niob	41
42	Mo	Molybdän	42	Mo	Molybdän	42	Mo	Molybdän	42
43	Tc	Technetium	43	Tc	Technetium	43	Tc	Technetium	43
44	Ru	Ruthenium	44	Ru	Ruthenium	44	Ru	Ruthenium	44
45	Rh	Rhodium	45	Rh	Rhodium	45	Rh	Rhodium	45
46	Pd	Platin	46	Pd	Platin	46	Pd	Platin	46
47	Ag	Silber	47	Ag	Silber	47	Ag	Silber	47
48	Cd	Kadmium	48	Cd	Kadmium	48	Cd	Kadmium	48
49	In	Indium	49	In	Indium	49	In	Indium	49
50	Sn	Zinn	50	Sn	Zinn	50	Sn	Zinn	50
51	Sb	Antimon	51	Sb	Antimon	51	Sb	Antimon	51
52	Te	Tellur	52	Te	Tellur	52	Te	Tellur	52
53	I	Jod	53	I	Jod	53	I	Jod	53
54	Xe	Xenon	54	Xe	Xenon	54	Xe	Xenon	54
55	Cs	Cäsium	55	Cs	Cäsium	55	Cs	Cäsium	55
56	Ba	Barium	56	Ba	Barium	56	Ba	Barium	56
57	La	Lanthan	57	La	Lanthan	57	La	Lanthan	57
58	Ce	Cer	58	Ce	Cer	58	Ce	Cer	58
59	Pr	Praseodym	59	Pr	Praseodym	59	Pr	Praseodym	59
60	Nd	Neodym	60	Nd	Neodym	60	Nd	Neodym	60
61	Pm	Promethium	61	Pm	Promethium	61	Pm	Promethium	61
62	Sm	Samarium	62	Sm	Samarium	62	Sm	Samarium	62
63	Eu	Europium	63	Eu	Europium	63	Eu	Europium	63
64	Gd	Gadolinium	64	Gd	Gadolinium	64	Gd	Gadolinium	64
65	Tb	Terbium	65	Tb	Terbium	65	Tb	Terbium	65
66	Dy	Dysprosium	66	Dy	Dysprosium	66	Dy	Dysprosium	66
67	Ho	Holmium	67	Ho	Holmium	67	Ho	Holmium	67
68	Er	Erbium	68	Er	Erbium	68	Er	Erbium	68
69	Tm	Thulium	69	Tm	Thulium	69	Tm	Thulium	69
70	Yb	Ytterbium	70	Yb	Ytterbium	70	Yb	Ytterbium	70
71	Lu	Lutetium	71	Lu	Lutetium	71	Lu	Lutetium	71
72	Hf	Hafnium	72	Hf	Hafnium	72	Hf	Hafnium	72
73	Ta	Tantal	73	Ta	Tantal	73	Ta	Tantal	73
74	W	Wolfram	74	W	Wolfram	74	W	Wolfram	74
75	Re	Rhenium	75	Re	Rhenium	75	Re	Rhenium	75
76	Os	Osmium	76	Os	Osmium	76	Os	Osmium	76
77	Ir	Iridium	77	Ir	Iridium	77	Ir	Iridium	77
78	Pt	Platin	78	Pt	Platin	78	Pt	Platin	78
79	Au	Gold	79	Au	Gold	79	Au	Gold	79
80	Hg	Quecksilber	80	Hg	Quecksilber	80	Hg	Quecksilber	80
81	Tl	Thallium	81	Tl	Thallium	81	Tl	Thallium	81
82	Pb	Blei	82	Pb	Blei	82	Pb	Blei	82
83	Bi	Bismut	83	Bi	Bismut	83	Bi	Bismut	83
84	Po	Polonium	84	Po	Polonium	84	Po	Polonium	84
85	At	Astatin	85	At	Astatin	85	At	Astatin	85
86	Rn	Radon	86	Rn	Radon	86	Rn	Radon	86
87	Fr	Francium	87	Fr	Francium	87	Fr	Francium	87
88	Ra	Radium	88	Ra	Radium	88	Ra	Radium	88
89	Ac	Actinium	89	Ac	Actinium	89	Ac	Actinium	89
90	Th	Thorium	90	Th	Thorium	90	Th	Thorium	90
91	Pa	Protactinium	91	Pa	Protactinium	91	Pa	Protactinium	91
92	U	Uran	92	U	Uran	92	U	Uran	92
93	Np	Neptunium	93	Np	Neptunium	93	Np	Neptunium	93
94	Pu	Plutonium	94	Pu	Plutonium	94	Pu	Plutonium	94
95	Am	Americium	95	Am	Americium	95	Am	Americium	95
96	Cm	Curium	96	Cm	Curium	96	Cm	Curium	96
97	Bk	Berkelium	97	Bk	Berkelium	97	Bk	Berkelium	97
98	Cf	Californium	98	Cf	Californium	98	Cf	Californium	98
99	Es	Einsteinium	99	Es	Einsteinium	99	Es	Einsteinium	99
100	Fm	Fermium	100	Fm	Fermium	100	Fm	Fermium	100
101	Md	Mendelevium	101	Md	Mendelevium	101	Md	Mendelevium	101
102	No	Nobelium	102	No	Nobelium	102	No	Nobelium	102
103	Lr	Lawrencium	103	Lr	Lawrencium	103	Lr	Lawrencium	103

Abbildung C.1.: Periodensystem der Elemente

Abbildungsverzeichnis

1.1. 2-Pin Led	2
1.2. Schaltsymbol Diode/LED	2
1.3. Beleuchtungsmarkt nach Anwendungsbereichen	7
1.4. LED-Anteil am Beleuchtungsmarkt	8
1.5. Volumen des Beleuchtungssektors	9
1.6. Technologien im Beleuchtungsmarkt	9
3.1. Kerzenlicht	14
3.2. Glühdrahtleuchtmittel	15
3.3. Energiesparlampe	16
3.4. Atommodell	17
3.5. Metallgitter	20
3.6. Quantenmechanisches Bandmodell	21
3.7. Dioden-Kennlinie	24
3.8. Buntfarbige LEDs	25
3.9. RGB	28
3.10. Blaue LED	29
3.11. UV-LED	29
4.1. Saphir	32
4.2. Korundschmelze	34
4.3. Kristallziehanlage	34
4.4. Kyropoulos-Verfahren	35
4.5. Sapphire Boules	36
4.6. EFG-Verfahren	36
4.7. Ausgebohrter Boule	37
4.8. Sapphire Wafer	38
4.9. Saphir-Wafer mit Abflachungs-Kennzeichnung	39
4.10. Gasphasen-Epitaxie	40
4.11. MOCVD-Anlage	41

Abbildungsverzeichnis

4.12. Planetar-Reaktor	42
4.13. Quantum Well	43
4.14. Chip-Orientierung der LED	44
4.15. LED-Winzling	48
4.16. Lichtfarbe und Wellenlänge	48
4.17. Phosphorportfolio	52
4.18. SMD-Chip mit Phosphorbeschichtung	53
4.19. Remote Phosphor	54
4.20. Wellenlängen und Frequenzen	56
4.21. CIE-Farbskala	57
4.22. Farbtemperatur	59
4.23. Luxmeter	63
4.24. Sphere	64
4.25. Binning Angaben	70
4.26. Lötangaben	71
4.27. Angaben zum Reel	71
5.1. MR16 Halogen-Spot	72
5.2. Interferenz	75
5.3. Weißlichtinterferogramm	76
5.4. Beugung nach Lochblende	77
5.5. Licht-Beugung	77
5.6. Optische Gesetze	78
5.7. Optische Linsen	79
5.8. Primäroptik	83
5.9. Linsen-Reflektoren	84
5.10. Fresnel-Spiegel	85
5.11. Kollimator	86
5.12. Wabenlinse	87
5.13. Waben-Kollimator	87
6.1. Temperatur-Strom	89
6.2. luminous-efficacy	90
6.3. COB	95
6.4. Heatmanagement im Chip	95
6.5. Lead-Frame	96
6.6. Heat-Slug	96
6.7. Thermal-Vias	97
6.8. MCPCB	98
6.9. Fourier-Prinzip	99

6.10. Pin vs. Fin	102
6.11. MR16-Heatsink	102
6.12. Konvektion Deckenspot	104
7.1. Maschenregel	108
7.2. Knotenregel	109
7.3. Rechte-Hand Regel	111
7.4. Skin-Effekt Ursache	112
7.5. Schema Skin-Effekt	113
7.6. Reihen-Schaltung	115
7.7. Parallelschaltung	116
7.8. Akku-LED-Flutlicht	120
7.9. Wechselstrom-Diagramm	121
7.10. AC-LED-Design	124
7.11. Acrich2-Samsung	126
7.12. Schema Ringkerntrafo	127
7.13. El-Trafo	128
7.14. Zertifizierungen	129
7.15. Bridge Rectifier	131
7.16. Bridge-Rectifier	131
7.17. Bridge-Rectifier2	132
7.18. Gleichrichter	132
7.19. Glättung	133
7.20. Ohm'scher Last	134
7.21. Induktive Last	135
7.22. Kapazitive Lastcharakteristik	136
7.23. LED-Konverter	138
7.24. CC-Konverter	139
7.25. Schema-CC-Verdrahtung	140
7.26. Killed-CC-Konverter	141
7.27. Phasenanschnitt	143
7.28. Phasenanschnitt-kapazitiv	144
7.29. Phasenabschnitt-Steuerung	145
7.30. Phasenabschnitt-Induktiv	146
7.31. Symbolik Lastcharakteristik	147
7.32. PWM-Signal	148
7.33. PWM	149
7.34. PWM-Modul	150
7.35. RF-PWM	152
7.36. Funk-Steuerung	153

Abbildungsverzeichnis

7.37. Infrarot-Steuerung	154
7.38. DALI-Driver	155
7.39. DMX-Steuerung	156
7.40. KNX-Dimm-Aktoren	158
7.41. ZigBee	159
8.1. LED-Bulb E27	173
8.2. LED-Bulbs avantgarde	174
8.3. LED-Birnen ohne Heatsink	175
8.4. E14-Retrofits	175
8.5. Korn-retrofit	177
8.6. Bauhöhe PAR16-Retrofit	179
8.7. Linsen-Optiken bei PAR16-Spots	180
8.8. MR16-Sekundäroptik	180
8.9. GU10 diverse	182
8.10. PAR38	183
8.11. AR111	184
8.12. ES111	185
8.13. G53	185
8.14. G4-Retrofits	186
8.15. G9	186
8.16. G23-Sockel	187
8.17. G24	188
8.18. G24 Sockel	189
8.19. Tube inside	190
8.20. T8-tube	192
8.21. T5	193
8.22. Sofitten	194
8.23. Diverse Sofitten	194
8.24. Voute	197
8.25. Aussenvoute RGB	198
8.26. LED Mini-Langfeldleuchte	199
8.27. Nutprofil-LED-Leuchten	200
8.28. LED-Strips	202
8.29. Strip-Connectors	203
8.30. Panel-Schnitt	206
8.31. LED-Panel	206
8.32. Backlight-Panels	207
8.33. Backleds	208
8.34. Downlights small	209

Abbildungsverzeichnis

8.35. Downlights big	209
8.36. LED-Glasfaser	211
8.37. Wandeinbauleuchte	212
8.38. Bodeneinbau	213
8.39. Aufbauleuchten	214
8.40. Wandleuchten	215
8.41. Wallwasher	216
8.42. Schienenstrahler	216
8.43. Flutlichtstrahler	217
8.44. COB-Flutlicht	218
8.45. High Bays	220
8.46. LED-Lichtband	221
9.1. LED-Display	223
10.1. Cooledge innovation	228
A.1. Ich	233
B.1. CC-Lizenz	234
C.1. Periodensystem der Elemente	236