

Was ist effiziente Beleuchtungstechnik?

Von staatlichen Stellen hört man es, in Fachzeitschriften liest man es und ganze Messen und Kongresse widmen sich dem Thema effizienter Beleuchtungstechnik. Doch welche Beleuchtung ist wirklich effizient? Und lohnt sich die Auseinandersetzung hiermit überhaupt? Wenn Leuchtstofflampen zum Einsatz kommen, was für ein Vorschaltgerät soll es denn sein?

Stefan Fassbinder

In der Schweiz werden etwa 11 % der gesamten erzeugten Elektrizität für Beleuchtung aufgewendet. Weltweit ist der Anteil deutlich höher, weil in weniger entwickelten Staaten tendenziell mehr elektrische Energie für die Beleuchtung bzw. weniger für andere Zwecke verbraucht wird. Tageslicht um die Mittagszeit ist weiss und besteht aus einem Gemisch sämtlicher für den Menschen wahrnehmbarer Farben. Nun ist aber das menschliche Auge für verschiedene Farben unterschiedlich empfindlich, was die wahrgenommene Helligkeit angeht. Auch die Tageszeit spielt für die Empfindlichkeit eine Rolle: Bei Tageshelligkeit ist die Empfindlichkeit zwischen Gelb und Grün am grössten, bei schwachem Licht verschiebt sie sich zu Blau hin. Bei ganz schwachem Licht schaltet das menschliche Auge auf Schwarzweiss um; in der Nacht sind tatsächlich alle Katzen grau. In der Einheit für die Be-

stimmung der Lichtleistung eines Leuchtmittels ist deshalb die Empfindlichkeit eines genormten «DurchschnittsAuges» berücksichtigt. Diese Einheit nennt sich Lumen [lm], (lateinisch Licht). Für die vom Menschen z. B. auf einem Tisch wahrgenommene Beleuchtungsstärke dient die Grösse Lux, hier gilt: $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$.

Wann ist eine Lichtquelle effizient? Theoretisch kann eine Lichtausbeute von genau 683 Lumen je Watt (lm/W) erreicht werden. Dies gilt jedoch nur für monochromatisches grünes Licht von 555 nm Wellenlänge, hier hat das menschliche Auge seine maximale Empfindlichkeit. Die «grünste anzunehmende Lampe» ist also tatsächlich grün. Allerdings, unabhängig von der politischen Gesinnung, lässt sich damit keine Strasse und auch keine Wohnung beleuchten. Für «weisses» Licht – oder das, was wir als weiss empfinden, wenn man alle Farben von 380...780 nm Wellenlänge im richtigen Verhältnis mischt – ergibt sich

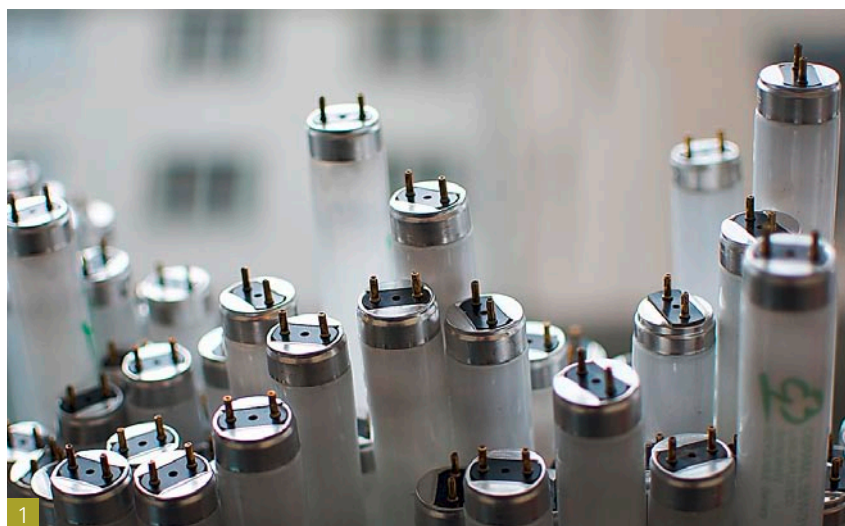


Oben induktives, unten elektronisches Vorschaltgerät.

ein theoretisches Maximum von 199 lm/W. Setzen wir dies gleich 100 % Wirkungsgrad, so liegen die besten Leuchtstofflampen ungefähr bei 60 % Wirkungsgrad, nämlich 120 lm/W und hier liegen auch die besten LED.

Es werde Licht!

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, künstliches Licht zu erzeugen. In Glühlampen waren es zuerst Kohlefäden, heute sind es Wolframdrähte, durch die so viel Strom fliesst, dass die Leiter sich bis zur Weissglut erhitzen – je weisser desto besser. Glühlampen setzen 90 % in Wärme und nur 10 % in sichtbares Licht um. Viel wirksamer funktioniert die Umwandlung elektrischen Stroms in einen Lichtstrom mittels einer Gasentladung. Zwar unterscheidet der elektrotechnische Sprachgebrauch zwischen Gasentladungslampen und Leuchtstofflampen, doch entsteht das Licht in beiden Fällen



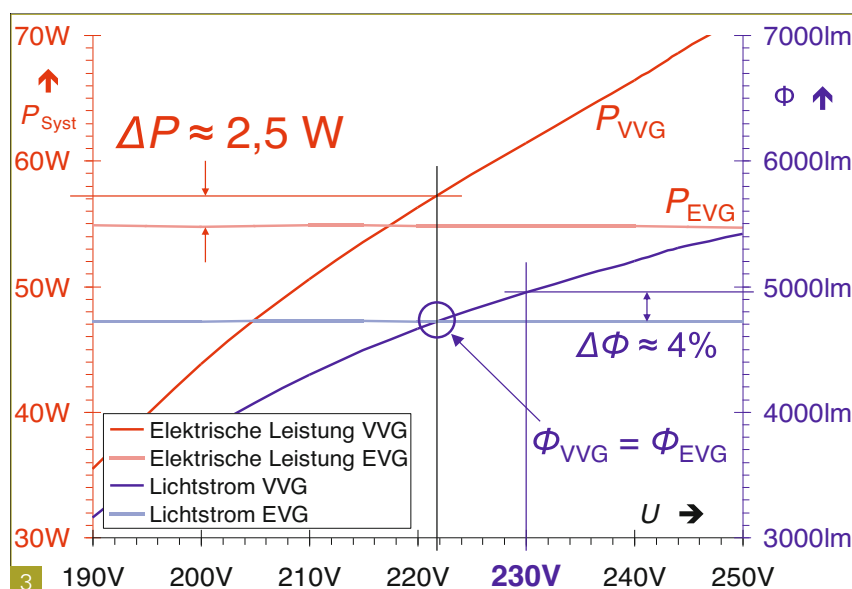
Leuchtstofflampen sind nach wie vor die Leuchtmittel für effiziente Energieumsetzung.

durch einen Prozess, der Gas elektrisch leitfähig macht und zum Leuchten anregt. In Leuchtstofflampen ist es Quecksilberdampf niedrigen Drucks und nicht etwa Neon, wie die volkstümliche Bezeichnung «Neonröhre» fälschlicherweise suggeriert. Es entsteht fast ausschließlich unsichtbares ultraviolettes Licht. Erst durch die an der Innenseite des Glasrohres aufgetragenen Leuchtstoffe entsteht sichtbares Licht. Die Lichtfarbe lässt sich durch die Zusammensetzung des Leuchtstoffs in weiten Grenzen steuern. Bei den «echten» Gasentladungslampen entsteht das sichtbare Licht direkt im Gas, die Farbzusammensetzung ist durch die Charakteristik der Gasfüllung gegeben.

Leuchtstofflampen: Stand der Technik

75 % allen Lichts wird von Leuchtstofflampen erzeugt, wozu diese aber nur 50 % der für die Beleuchtung verwendeten Energie benötigen. Wegen der besonderen Physik des Stromdurchgangs durch ein Gas, die sozusagen das Ohmsche Gesetz auf den Kopf stellt, kann man solche Lampen generell nicht direkt ans Stromnetz anschliessen, sonst passiert entweder gar nichts oder es knallt. Zwischen Lampe und Netz gehört ein Vorschaltgerät, das zunächst einen hohen Spannungsimpuls erzeugt, um den Stromfluss in Gang zu setzen, und fortan den Strom begrenzt, damit der Strom nicht so gross wird, dass der Glaskolben explodiert. Eigentlich sind Gase Isolierstoffe. Wenn aber an den Enden des Glasrohres die Glühdrähte aufleuchten, löst sich eine Elektronenwolke ab. Wenn nun der Starter beim konventionellen Vorschaltgerät den Stromfluss plötzlich unterbricht, entsteht ein Hochspannungspuls durch die Selbstinduktion und macht das Gas dadurch leitfähig; die Lampe leuchtet.

Konventionelle Induktive Vorschaltgeräte (KVG) sind für billigste Materialkosten ausgelegt ohne Rücksicht auf hohe Verluste im Betrieb. Daneben gibt es Verbesserte Induktive Vorschaltgeräte (VVG), diese sind auf minimale Verluste getrimmt. Sie sind etwas grösser, weil mehr Kupfer und Eisen anfällt. Die Elektronischen Vorschaltgeräte (EVG) erzeugen in einem ersten Schritt aus der Netzspannung eine Gleichspannung und setzen dann diese Gleichspannung wieder in eine Wechselspannung von 20...60 kHz um. Durch diese viel höhere Frequenz lassen sich Kondensatoren und Spulen viel kleiner auslegen. Ein Starter erübrigt sich, weil dieser in der Elektronik integriert ist. Diese Technik



kostet allerdings ein Mehrfaches eines KVG, während ein VVG für knapp 50 % Aufpreis zu haben ist.

In einem Vorschaltgerät für eine Leuchtstofflampe von 58 W Nennleistung entstehen Verluste von mindestens 5 W, höchstens 15 W. Nun sind beim EVG nicht nur die Wicklungen und damit die darin auftretenden Verluste wesentlich kleiner, sondern auch die Lampe produziert je eingespeistes Watt etwas mehr Licht und etwas weniger Wärme, was mit der hohen Betriebsfrequenz zusammenhängt. Bedauerlicherweise wird beim Vergleich von konventionellen Vorschaltgeräten mit elektronischen stets das beste EVG dem schlechtesten KVG gegenübergestellt, und die Existenz des VVG bleibt unerwähnt. Das liegt an zwei strukturellen Eigentümlichkeiten des Marktes:

- Die grossen Lampenhersteller treten teilweise auch als Hersteller von Vorschaltgeräten auf – aber wenn, dann nur von EVG.
- Die wenigen in Westeuropa tätigen Anbieter von KVG und VVG bieten allesamt anderenorts oder in einem anderen Geschäftsbereich auch EVG an und bewirtschaften natürlich jene

Absenkung der System-Betriebsspannung, bis die Helligkeit der Lampe mit VVG Klasse B1 und EVG Klasse A3 gleich ist, Ermittlung der Systemleistungsdifferenz an diesem Punkt (wobei dieses EVG als EEI = A3 ausgewiesen war, nach der vorliegenden lichttechnischen Messung aber sogar die Forderung der Klasse A2 erfüllt).

Geräte, welche die höchste Wertschöpfung versprechen.

Somit verkaufen sich die vielen KVG überall dort, wo nur auf den Anschaffungspreis geachtet wird. Wer nun auch auf die Energiekosten achtet, lässt sich beraten, und dem wird das EVG mit einer ganzen Reihe von Vorteilen empfohlen.

Tabelle 1 gibt leider nur die absoluten elektrischen Nennwerte wieder und sagt nichts über die Lichtleistung der Lampe aus. Diese ist nämlich beim Betrieb mit EVG rund 4 % geringer, als mit konventionellen Vorschaltgeräten, weil mit verminderter Lampenspannung gearbeitet wird. Weiterhin weicht die tatsächliche praktische Auslegung induktiver Vorschaltgeräte aller Klassen heute erheblich von den Nennwerten ab. Betreibt man die Lampe an einem modernen VVG der Effizienzklasse B1 und nur an 222 V statt 230 V, um hier Gleiches mit

Lampen-Nennleistung		Maximale Leistungsaufnahme Lampe mit Vorschaltgerät					
50 Hz (KVG/VVG)	HF (EVG)	Klasse D	Klasse C	Klasse B2	Klasse B1	Klasse A3	Klasse A2
15 W	14 W	> 25 W	25 W	23 W	21 W	18 W	16 W
18 W	16 W	> 28 W	28 W	26 W	24 W	21 W	19 W
30 W	24 W	> 40 W	40 W	38 W	36 W	33 W	31 W
36 W	32 W	> 45 W	45 W	43 W	41 W	38 W	36 W
38 W	32 W	> 47 W	47 W	45 W	43 W	40 W	38 W
58 W	50 W	> 70 W	70 W	67 W	64 W	59 W	55 W
70 W	60 W	> 83 W	83 W	80 W	77 W	72 W	68 W

Tabelle 1: Werte und Klassen stabförmiger Leuchtstofflampen mit Vorschaltgeräten (Auszug aus der EU-Verordnung 2000/55/EG – Klasse A1 ist dimmbaren EVG vorbehalten).

Gleichem zu vergleichen, so ist die Helligkeit wieder gleich derer des EVG (Bild 5). Dann beträgt die Leistungsaufnahme der gesamten Leuchte mit EVG unverändert 54,8 W. Mit VVG sind es aber nur 56,9 W, also weniger als die Lampe allein verbrauchen sollte, und somit weit weniger als die in der Verordnung vorgesehenen 64 W! Die Einsparung gegenüber dem Betrieb mit EVG liegt damit nur noch bei $\approx 2,1$ W statt der 9 W, die man nach Tabelle 1 hier erwartet hätte.

Interessant ist noch eine kleine Kostenberechnung. Wenn also ein gutes VVG mit einem guten EVG verglichen wird, müsste das EVG rund 400 Stunden in Betrieb sein, um eine einzige Kilowattstunde zu sparen. Die kostet im gewerblichen Bereich rund 15 Rappen und damit dauert es 2700 Betriebsstunden, bis der erste Franken eingespart ist. Ein Vorschaltgerät der Klasse VVG ist für rund 18 Franken zu haben, wogegen ein EVG rund 70 Franken kostet. Selbst wenn der Erstausrüster diese enormen Investitionskosten auf sich nimmt, sind 140 000 Betriebsstunden nötig, um den Mehrpreis wettzumachen. So hoch ist die Lebenserwartung des EVG gar nicht.

Kauft man ein VVG für 240 V, betreibt es aber an 230 V, würde bei einer 58-W-Lampe eine Energieeinsparung von 8 % erfolgen und eine 6 % geringere Lichtleistung. Damit wäre ein VVG nur noch 2 % vom EVG weg. Startschwierigkeiten sind dadurch nicht zu erwarten.

EVG-Einsatz immer gerechtfertigt?

Fast wie ein Mantra werden Vorteile des EVG gegenüber dem VVG oder gar KVG rezipiert, ohne ernsthaft wahre Tatsachen aufzuspüren. So heisst es:

- *EVG haben einen besseren Wirkungsgrad, also geringere Eigenverluste als VVG.* Nimmt man jedoch die Werte aus Tabelle 1 als gegeben hin, ist unter Umständen das Gegenteil der Fall: Klasse B1 $64 \text{ W} - 58 \text{ W} = 8 \text{ W}$; Klasse A3 $59 \text{ W} - 50 \text{ W} = 9 \text{ W}$.
- *Das 100-Hz-Flimmern des Lichts ist bei der hohen Betriebsfrequenz der EVG nicht mehr wahrnehmbar.* Tatsache ist, dass heutige Leuchtstoffe so träge sind, dass Flimmern auch bei 50-Hz-Betrieb kaum ein Thema ist.
- *Moderne EVG sind auch mit der sogenannten Cut-off-Technologie verfügbar, die die Kathodenheizung abschaltet, sobald die Lampe gezündet hat.* Das ist eine Eigenschaft, die bei induktiven Geräten zur Anwendung kommt, seit es diese Geräte gibt.
- *Die Lebenserwartung der Leuchtstofflampen ist beim Betrieb am EVG etwa 30 %*



Elektronische Starter mit unterschiedlichen, frei wählbaren Eigenschaften.

länger – vorausgesetzt, die EVG verfügen über den sogenannten Warmstart. Das gilt, wenn der Vergleich mit Glimmstarten gemacht wird, nicht aber beim Einsatz elektronischer Starter.

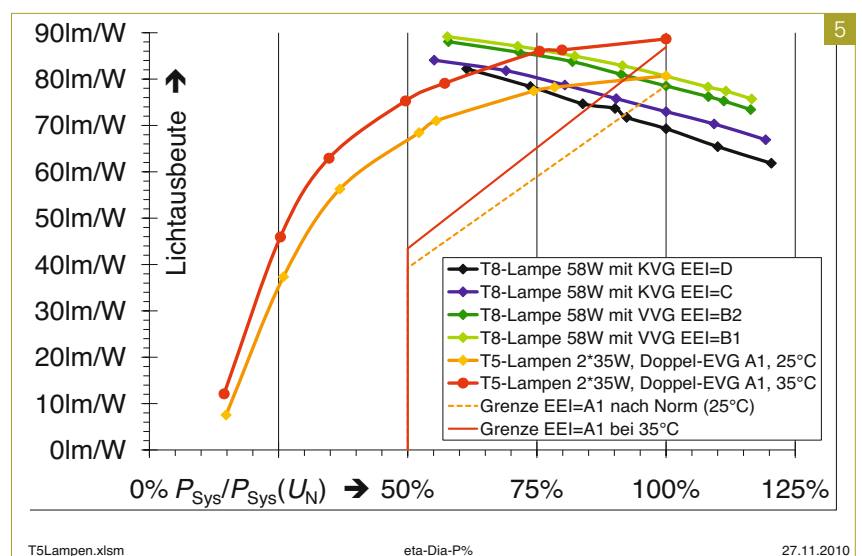
- *EVG sind auch mit Sofortstart-Fähigkeit verfügbar.* Bei elektronischen Startern gibt es das auch.
- *Defekte Lampen werden automatisch abgeschaltet, statt die Anwesenden durch das ständige Aufblitzen fortwährender Neustartversuche zu nerven und während dessen auch noch im Vorschaltgerät erhöhte Verluste zu verursachen.* Elektronische Starter verfügen ebenfalls über diese Technik.
- *Die neuen, ausschliesslich für den Betrieb an EVG vorgesehenen, nur 16 mm dicken T5-Lampen sind noch effizienter.* Das gilt, wenn die Umgebungstemperatur etwa 35°C beträgt, was bei Einbauleuchten zutrifft, und wenn Lampen der Typenreihe »T5HE« (High Efficiency) gewählt werden. Die helleren »T5HO«-Lampen (High Output) haben schlechtere Lichtausbeuten als die konventionellen T8-Lampen.

- *EVG können durch Dimmbarkeit und damit einer Konstantlicht-Regelung zusätzlich Energie sparen.* Da werden gleich zwei wichtige Tatsachen unterschlagen: Dimmbare EVG sind im Preis doppelt so hoch wie normale EVG und die Lichtausbeute geht drastisch zurück bei der Dimmung. Zudem haben dimmbare EVG recht hohe Bereitschaftsverluste, wenn sie nicht ganz abgeschaltet werden.

Effizienz im Labor untersucht

Wie schon erwähnt, heisst es überall, ein EVG habe wesentlich geringere innere Verluste als ein VVG! Das wollten ein paar Skeptiker wirklich wissen. Bei einem unabhängigen akkreditierten Lichtlabor wurden vom Deutschen Kupferinstitut DKI und der Firma M & R Multitronik Messungen in Auftrag gegeben, um die prinzipiellen Potenziale zweier recht verschiedener Energiesparmethoden in der Beleuchtungstechnik besser abschätzen zu können.

Alle Lampen wurden gemäss Norm (IEC 60081) bei einer Umgebungstemperatur



Effizienzen verschiedener Systeme mit Leuchtstofflampen T5 und T8, aufgetragen über der relativen Systemleistung.

peratur von 25 °C gemessen, bei der sie im Allgemeinen den besten Wirkungsgrad entwickeln. Die T5-Lampen wurden darüber hinaus, abweichend von der Norm, auch noch bei einer Umgebungstemperatur von 35 °C gemessen, da sie aus guten Gründen auf diese Temperatur hin optimiert sind.

Die Ergebnisse sind zusammenfassend in Bild 5 dargestellt, wo die Lichtleistung der Systeme über der jeweiligen elektrischen Leistungsaufnahme aufgetragen wurde. Ausserdem wurde in das Diagramm eine Gerade eingetragen, die eine konstante Effizienz von $\eta = 80 \text{ lm/W}$ wiedergibt, was heutzutage als eine Leitlinie für die Beleuchtungstechnik gelten sollte. Hieraus wird ersichtlich:

- Die Effizienz eines jeden T8-Systems nimmt beim Drosseln der Leistung zu. Tendenziell liegen die Werte im unteren Leistungsbereich oberhalb der «Leitlinie», während sie nach oben hin darunter fallen und insbesondere bei Überlastbetrieb stark verflachen.
- Die T5-Lampen weisen das umgekehrte Verhalten auf: Die Effizienz nimmt beim Dimmen ab. Tendenziell liegen die Werte im oberen Bereich oberhalb, im unteren Bereich unterhalb der «Leitlinie». Dieses Verhalten ist «normal» und lässt sich übrigens auch an dimmbaren Kompakt-Leuchtstofflampen (KLL) beobachten.
- Die bei 35 °C gegenüber 25 °C bessere Effizienz der T5-Lampen ist deutlich zu erkennen. Weil ein direkter Vergleich der Systeme nicht taugt, da es keine T5-Lampen und T8-Lampen mit jeweils gleicher Nennleistung gibt, wurde die Lichtausbeute über der relativen Systemleistung aufgetragen.
- Unter der relativen Systemleistung ist bei den T8-Systemen das Verhältnis der im jeweiligen Punkt gemessenen Leistungsaufnahme zu der bei Nennspannung gemessenen Leistungsaufnahme desselben Systems zu verstehen (so liegt der Bezugspunkt von 100 % z.B. des KVG EEI = C bei 69 W, des VVG EEI = B1 bei 61,4 W, was den Systemmesswerten bei 230 V entspricht).
- Beim T5-System ist hierunter das Verhältnis der im jeweiligen Punkt gemessenen Leistungsaufnahme zu der im ungedimmten Zustand gemessenen Leistungsaufnahme zu verstehen.

Beobachtungen:

- Das gemessene T5-System übertrifft die Mindestanforderungen bei Weitem.
- Man sieht jetzt noch deutlicher, dass die Effizienz der T8-Systeme beim

Drosseln der Leistung zunimmt und bei Überlast unverhältnismässig stark abfällt, die Effizienz des T5-Systems jedoch bei voller Last am besten ist und beim Dimmen abfällt.

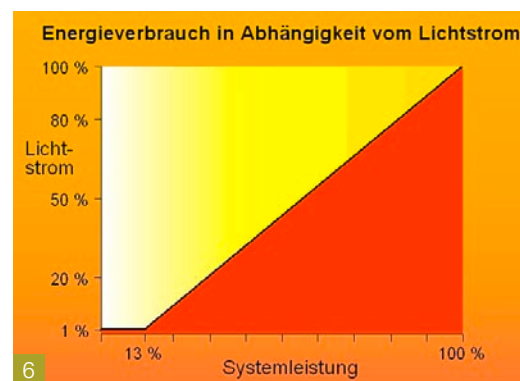
- Bei voller Last und 25 °C Umgebungstemperatur ist das T5-System etwa gleich gut wie das beste T8-System (EEI = B1).
- Bei voller Last und 35 °C Umgebungstemperatur ist das T5-System um $\approx 10 \%$ effizienter als das beste T8-System (EEI = B1) bei 25 °C.
- Bei Reduktion bzw. Dimmung auf $\approx 75 \%$ (hier der jeweils bei 230 V bzw. ungedimmt gemessenen elektrischen Leistung, nicht des Lichtstroms) ist die Effizienz des besten T8-Systems etwa gleich der des T5-Systems bei 35 °C.
- Bei Reduktion bzw. Dimmung auf $\approx 60 \%$ fällt das T5-System auch hinter ein T8-System mit einem uralten KVG EEI = D zurück.
- Bei Reduktion auf $\approx 50 \%$ endet der mögliche Anwendungsbereich der Spannungsabsenktechnik. Die Lampen verlöschen sonst vollständig. Weitergehende Dimmung ist nur mit dimmbarem EVG möglich.

Verluste durch Verluste ersetzen?

Dimmbare EVG benötigen zusätzlich zur Energieversorgung eine Steuerleitung. Die Energieversorgung muss dabei ständig unter Spannung bleiben, damit die Elektronik bereit ist, auf die Signale aus der Steuerleitung zu reagieren. Die Stellung «Licht aus» entspricht daher lediglich der «Dimmstufe 0», in der noch immer die Kathoden beheizt werden, was im Dimmbetrieb erforderlich ist, also vergleichsweise beim Auto «Leerlauf im Stillstand», nicht etwa «Motor aus». Neuere EVG verfügen über eine «echte» Funktion «Licht aus», wobei hier die Bereitschaftsverluste unter 1 W liegen. Sofern die Dimmbarkeit als Energiesparmassnahme eingesetzt wird, sollten die Leuchten bei Nichtgebrauch ganz abgeschaltet werden. Es ist auch zu berücksichtigen, dass ein EVG gemäss der Verordnung 2000/55/EU in Klasse A1 fällt, sobald es

- sich mindestens bis auf 10 % herunterdimmen lässt,
- bei Einstellung auf volle Helligkeit die Bedingungen der Klasse A3 erfüllt und
- bei 25 % Helligkeit nicht mehr als 50 % der Leistung der Klasse A3 aufnimmt.

Also ist ein A1-EVG bei voller Leistung nicht besser als ein A3-EVG, und beim



Auch bei Dimmung auf 1 % der Helligkeit bleiben 13 % des Stromverbrauchs stehen.

Dimmen verliert es noch einmal die Hälfte seiner Lichtausbeute. In strichpunktiierten Linien ist diese Anforderung im Diagramm einmal für Messung bei 25 °C und einmal bei 35 °C zur Orientierung mit aufgenommen. Nebenbei, da schneiden LED-Leuchten viel besser ab, denn deren Lichtausbeute steigt sogar an, wenn sie gedimmt werden, weil die Durchflussspannung der LED sinkt. In Grossraumbüros und Schulzimmern scheint eine Konstantlichtregelung jedoch weit über das Ziel hinaus zu schießen. Wenn man hier dafür sorgt, dass sich das Licht – gegebenenfalls gruppenweise – vollständig abschaltet, wenn kein Kunstlicht gebraucht wird, spart man unter Umständen am meisten. Leuchten, die sich wirklich problemlos bis auf 1 % dimmen lassen, werden sich aber vor allem für Vortragsäle eignen. Dabei geht es jedoch nicht um Energieeinsparung, sondern darum, dass für bestimmte Zwecke eben ein sehr schwaches Licht benötigt wird.

Fazit

Das Energiesparpotenzial dimmbarer EVG ist recht begrenzt. Wer Energie sparen will, setzt sinnvollerweise auf eine Kombination aus Spannungsabsenktechnik und anschliessender gruppierter Abschaltung. Wenn dies nicht reicht, ist eine Technik anzuwenden, die mit kleinsten Bereitschaftsverlusten auskommt. Kommen KVG oder besser eben VVG zum Einsatz, sind elektronische Starter sehr zu empfehlen, da sie bei häufigen Schaltungen sowohl Lampen als auch Nerven schonen und einen flackerfreien Start ermöglichen. Bei Konstantlichtregelung kommen häufig gedimmte Leuchtstofflampen zum Einsatz. Hier könnte es sinnvoll sein, den tatsächlichen Energiegewinn ernsthaft zu prüfen, weil Leuchtstofflampen, wie gezeigt, bei einer Dimmung auf 20 % einen deutlich schlechteren Wirkungsgrad aufweisen. ■

sfassbinder@kupferinstitut.de