Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 87 (1996)

Heft: 7

Artikel: Mikroelektronik hält Einzug in der Lichttechnik : moderne Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen senken Kosten und Energieverbrauch

Autor: Meier, Markus

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902312

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 01.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Leuchtstofflampen benötigen zu ihrem Betrieb Vorschaltgeräte, welche einerseits die Zündung der Lampen ermöglichen und andererseits im Betrieb den Entladungsstrom der Lampen begrenzen. Die seit vielen Jahren eingesetzten, konventionellen Vorschaltgeräte mit Drossel und Glimmlampen-Bimetallschalter werden in neuerer Zeit immer mehr durch elektronische Vorschaltgeräte ersetzt. Im vorliegenden Artikel werden die alten und neuen Technologien aus technischer und wirtschaftlicher Sicht miteinander verglichen.

Mikroelektronik hält Einzug in der Lichttechnik

Moderne Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen senken Kosten und Energieverbrauch

■ Markus Meier

Unter den elektrischen Lichtquellen nimmt die Leuchtstoffröhre heute eine hervorragende Stellung ein. Diese Lichtquelle hat in den mehr als 50 Jahren seit ihrer Einführung eine grosse Verbreitung gefunden und wurde stetig weiterentwickelt. In den letzten Jahren hat sie durch Fortschritte an der Lampe selbst, aber auch am Vorschaltgerät starke Verbesserungen erfahren. Dieser Beitrag geht zuerst auf die Wirkungsweise der Leuchtstofflampe ein, bespricht die Notwendigkeit und Funktion des Vorschaltgeräts und zeigt, wie durch den Einsatz von mikroelektronischen Komponenten die Funktionen des Vorschaltgeräts sowie die Effizienz und die Lebensdauer der Leuchtstofflampe verbessert werden können. Diese Entwicklungen erlauben es, Kosten und Energieverbrauch zu senken.

Licht und Lichtquellen

Licht spielt in der Biologie und in der Entwicklung des Menschen eine herausragende Rolle. Weitaus der grösste Teil der Sonnenenergie gelangt in Form von sichtbarem Licht zu uns auf die Erde. Der grundlegende Vorgang der Photosynthese bezieht die Energie aus dem Sonnenlicht. Der Lebensrhythmus des Menschen wird sehr stark durch den täglichen und jährlichen Zyklus des Sonnenlichtes bestimmt. Die Sonne hat in vielen Religionen eine Bedeutung erlangt als Symbol für Reinheit, das Gute oder die Weisheit.

Schon früh hat der Mensch versucht, Licht zu erzeugen, um damit unabhängig von den natürlichen Lichtquellen zu sein. So konnte er den Arbeitstag, besonders im Winter, verlängern und gewann eine zunehmende Unabhängigkeit von der Natur. Dies gelang ihm zuerst mit dem Feuer und den verwandten Lichtquellen wie Kienspan, Öllampe und Kerze. Alle diese Lichtquellen erzeugen bei der Verbrennung Wärme, die Russteilchen aus dem Verbrennungsprozess zum Glühen bringt und die damit Licht abstrahlen. In dieser Beziehung sind die Lichtquellen der Sonne verwandt, die ebenfalls Licht durch ihre hohe Temperatur abstrahlt. Allerdings erreicht man bei der Verbrennung nur etwa 1400 Grad Celsius, bei der Sonne sind es etwa 5500 Grad Celsius. Man erzielt darum mit den Wärmelichtquellen nie ein solch weisses Licht wie die Sonne. Auch ist der Wirkungsgrad sehr schlecht, da der grösste Teil der Energie in Form von Wärme (Wärmestrahlung und heisse Abgase) verlorengeht.

Adresse des Autors:
Markus Meier, Dr. sc. nat. ETH, Abteilungsleiter Fachunterricht, Ingenieurschule HTL, Bitterten-strasse 15, 4702 Oensingen. E-Mail: meier@isoe.ch.

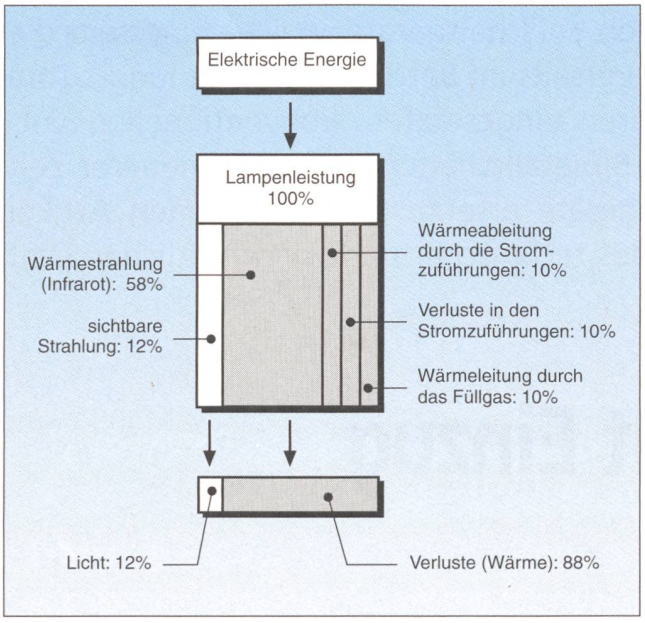

Bild 1 Energiebilanz einer Glühbirne

Im Laufe des 19. und 20. Jahrhunderts hat der Mensch alle seine technischen und naturwissenschaftlichen Kenntnisse eingesetzt, um die Lichtquellen laufend zu verbessern. Eigentliche «Epochen» waren im 19. Jahrhundert die Petrollampen, die Gasbeleuchtung und ab 1880 die elektrische Beleuchtung mit der Glühlampe. Mit der Glühlampe, von verschiedenen Erfindern entwickelt, aber erst durch Edisons beharrlichen Geist zu einer brauchbaren Zuverlässigkeit gebracht, stand nun eine «ideale» Lichtquelle zur Verfügung: sauber, sofort betriebsbereit und sicher. Zusammen mit den rasanten Entwicklungen der Elektrotechnik am Ende des 19. Jahrhunderts schaffte die Glühlampe den Durchbruch als universelle Lichtquelle. Minimale Investitionen zeichneten diese Lampe schon früh aus. Die Suche nach besseren Materialien führte schliesslich zur heute bekannten Vakuumglühlampe mit Wolframwendel. Damit sind Glühtemperaturen von etwa 2500 bis 3000 Grad Celsius möglich (die Schmelztemperatur von Wolfram liegt bei rund 3200 Grad Celsius). Dies ergibt ein angenehmes warmes Licht. Die materialbedingte Begrenzung auf diese Temperaturen hat aber den schlechten Wirkungsgrad der Glühlampen von ungefähr 12% zur Folge (Bild 1); die Nachahmung des Vorbildes Sonne wird durch die Eigenschaften der vorhandenen Materialien erschwert. Nebenbei sei erwähnt, dass Edison mit der Glühlampe einen grundlegenden Effekt entdeckte (Edison-Effekt), dessen Tragweite aber nicht erkannte. Er fand, dass sich ein in die Glühlampe eingeschmolzener Draht durch die Thermoemission von Elektronen aus dem Glühfaden negativ auflud: Elektronen können aus dem Glühdraht (Kathode) austreten und durch das Vakuum zur anderen Elektrode (Anode) fliegen. Diese Entdekkung führte zur Entwicklung der Elektronenröhre (Diode und Triode), die in den ersten 50 Jahren unseres Jahrhunderts überhaupt die Entwicklung der Elektronik, besonders von Radio und Fernsehen, ermöglichte.

Die starke Zunahme des Wissens in Physik und Chemie und dessen konsequente Anwendung in der Technik hat den Entwicklern in diesem Jahrhundert neue Wege eröffnet, Licht zu erzeugen, das nicht von heissen Körpern abgestrahlt wird. Es wurde möglich, mit elektrischem Strom Atome und Moleküle so anzuregen, dass sie sichtbares Licht ausstrahlen. Diese Entwicklungen führten zur Leuchtstofflampe, die in den dreissiger Jahren entwickelt wurde und nach dem Zweiten Weltkrieg den Siegeszug antrat. Dieser Lampentyp spielt heute die dominierende Rolle: Er erzeugt heute in der Schweiz etwa 80% des Lichtes, verbraucht aber nur etwa 55% des für die elektrische Beleuchtung benötigten Stromes. Zwar verursacht die Leuchtstofflampe gegenüber Glühlampen höhere Investitionskosten, diese werden aber durch kleinere Energiekosten bald wettgemacht. Entwicklungen in den letzten Jahren sowohl bei den Leuchtstofflampen als auch bei den Vorschaltgeräten haben zu erhöhter Qualität des Lichtes, längerer Lebensdauer der Lampen und weiter verminderten Energiekosten geführt. Der nächste Abschnitt soll kurz die Wirkungsweise der Leuchtstoffröhre und die Anforderungen beim Betrieb zeigen.

Die Leuchtstofflampe

Im Gegensatz zur Glühlampe wird in einer Leuchtstofflampe die elektrische Energie ohne Erzeugung von Hitze gezielt in Licht umgewandelt. Bild 2 zeigt schematisch den Aufbau einer Leuchtstofflampe.

In einer Glasröhre befindet sich Quecksilbergas unter einem sehr kleinen Druck (etwa 0,5 Pa oder 0,000 005 bar). Zusätzlich ist ein Puffergas mit wesentlich höherem Druck vorhanden (etwa 100–500 Pa oder 0,001–0,005 bar), es führt zu tieferen Zündspannungen, nimmt aber an der Lichterzeugung nicht teil. Wird nun eine genügend grosse Spannung (grösser als die sogenannte Zündspannung) an die Röhre angelegt, dann treten aus der geheizten, am Minuspol der Spannungsquelle liegenden Elektrode Elektronen aus, die unter der Wirkung der elektrischen Spannung gegen die positive Elektrode beschleunigt wer-

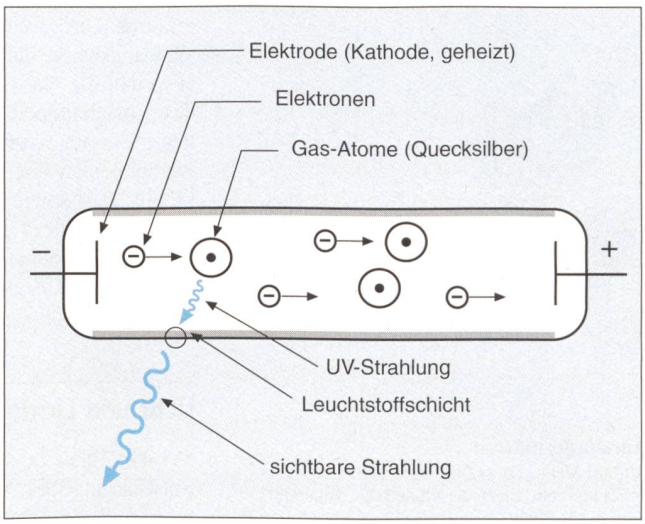

Bild 2 Vorgänge in einer Leuchtstofflampe

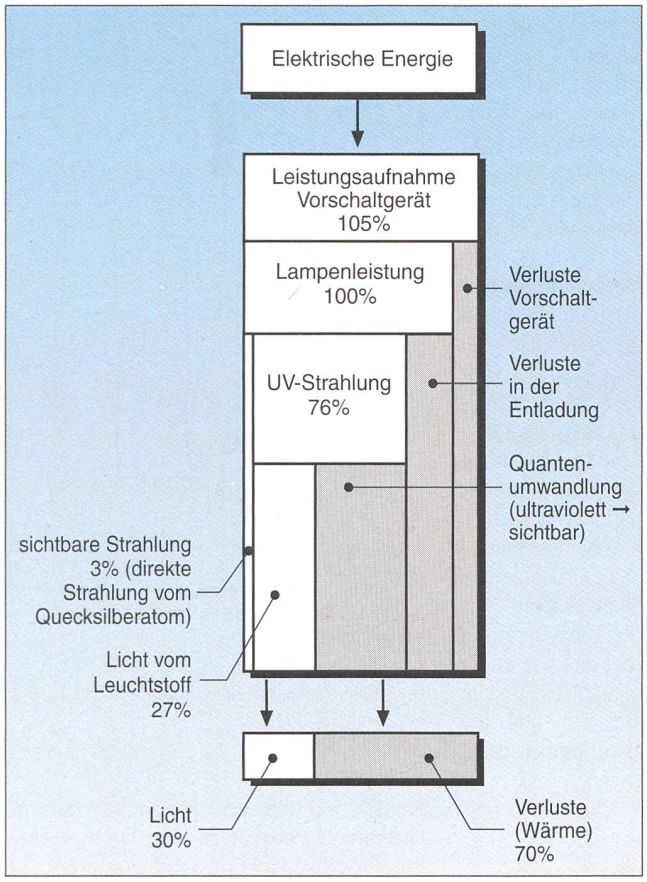

Bild 3 Energiebilanz einer Leuchtstofflampe

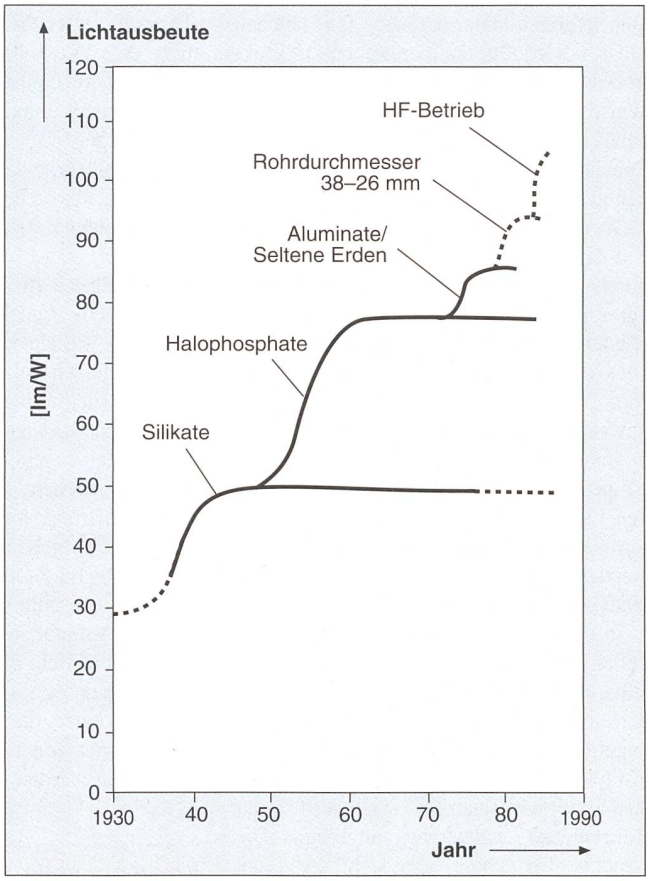

Bild 4 Die Entwicklung der Lichtausbeute von Leuchtstofflampen

den. Auf ihrem Flug durch das Gas stossen sie immer wieder mit Quecksilberatomen zusammen. Wenn die Elektronen genügend schnell sind, also genügend Energie haben, dann können sie in einem Quecksilberatom ein Elektron auf eine höhere Bahn heben. Die Elektronen verlieren dabei an Geschwindigkeit und Energie, werden aber durch die Spannung erneut beschleunigt und können so auf ihrem Flug von der Kathode zur Anode auf diese Weise mehrmals Atome anregen. Ein angeregtes Quecksilberatom sendet die so erhaltene Energie nach kurzer Zeit in Form von vorwiegend ultravioletter Strahlung bei ganz bestimmten Wellenlängen wieder aus; nur etwa 4% der Strahlung (1,5% der Gesamtenergiebilanz) werden direkt als sichtbares Licht ausgestrahlt. Das ultraviolette Licht fällt auf den Leuchtstoff, der auf der Innenseite der Leuchtstofflampe in Form einer dünnen Schicht aufgebracht ist (dies ist die mattweisse sichtbare Schicht der Leuchtstoffröhre). Das einfallende Licht wird in dieser Schicht absorbiert und hebt dabei im Leuchtstoff Elektronen auf höhere Energieschalen. Nach einer bestimmten Zeit sendet der so angeregte Leuchtstoff sichtbares Licht aus. Dieses Licht wird an bevorzugten Stellen im sichtbaren Spektralbereich ausgestrahlt. Dadurch erreicht man mit Leuchtstofflampen nicht die gleich gute Farbwiedergabe (Farbtreue) wie mit Tageslicht, das gleichmässig über den ganzen sichtbaren Bereich verteilt ist.

Bei der Umwandlung der elektrischen Energie wird also nicht wie bei der Glühlampe zuerst Wärme erzeugt und damit die Ausstrahlung von Licht bewirkt. Die Umwandlung findet sehr gezielt in zwei Stufen statt: Elektrisch beschleunigte Elektronen geben die Energie an Quecksilberatome weiter; diese strahlen *ultraviolettes* Licht aus, das von den Leuchtstoffen in *sichtbares* Licht umgewandelt wird. Die Energieumwandlung erfolgt bei Leuchtstofflampen mit einem wesentlich höheren Wirkungsgrad (Bild 3) als bei Glühlampen. Insbesondere erfolgt die erste Umwandlung (elektrische Energie in ultraviolette Strahlung) mit einem Wirkungsgrad von 76%. Die zweite Umwandlungsstufe erreicht allerdings nur noch etwa 35%. Hier wird ein energiereiches ultraviolettes Lichtquant in ein sichtbares Lichtquant kleinerer Energie umgewandelt. Dieser Verlust ist grundsätzlicher Natur und kann nicht so leicht umgangen werden. Der vergleichsweise hohe Gesamtwirkungsgrad ist das Ergebnis einer systematischen Entwicklung der Leuchtstoffröhren (besonders deren Leuchtstoffe) in den letzten 60 Jahren (Bild 4). In neuerer Zeit wurde besonders durch die Entwicklung von Dreibandenfarbstoffen (Aluminate/seltene Erden) der Mangel der schlechten Farbwiedergabe der Leuchtstoffröhren verbessert. Deutliche Verbesserungen im Wirkungsgrad brachten auch die Lampenform (Durchmesser) und besonders der Hochfrequenzbetrieb (siehe unten).

Beim üblichen Betrieb der Leuchtstoffröhre mit 50-Hz-Wechselstrom liegen in einer Sekunde 50 positive und 50 negative Halbwellen an der Leuchtstofflampe; die beiden Elektroden tauschen also laufend ihre Rolle. Somit müssen beide Elektroden geheizt sein, damit Elektronen austreten können. Im normalen Betrieb ist dazu aber kein spezieller Heizstrom notwendig, da ein weiterer Effekt zu Hilfe kommt: Im Gas der Leuchtstofflampe befinden sich nicht nur Elektronen, sondern auch positiv geladene Atome, sogenannte Ionen. Unter der Wirkung der elektrischen Spannung bewegen sich diese Ionen gegen die negativ geladene Elektrode und prallen an dieser auf. Dabei geben sie ihre Bewegungsenergie ab und können damit die Elektroden laufend heizen. Die Ionen werden im Gas der Leuchtstofflampe laufend durch die Stösse der Elektronen mit den

Quecksilberatomen erzeugt. Bei solchen Stössen wird Quecksilberatomen ein Elektron weggestossen. Man erhält auf diese Weise je ein positiv geladenes Ion und ein neues Elektron. Bei der Inbetriebnahme der Leuchtstofflampe müssen aber die Elektroden gesondert mit Strom geheizt werden.

Wenn nach einer positiven oder negativen Halbwelle die elektrische Entladung durch die Leuchtstofflampe löscht, dann vereinigen sich die Ionen und Elektronen wieder zu neutralen Quecksilberatomen. Dies geschieht glücklicherweise nicht sofort, da dieser Vereinigungsprozess eine gewisse Zeit braucht. Wenn die nächste Spannungshalbwelle an der Leuchtstofflampe anliegt, führen die noch vorhandenen Ladungsträger zu einer deutlich tieferen Zündspannung als beim Start. Die Netzspannung reicht dann aus, um bei jeder neuen Halbwelle neu zu zünden.

In der Leuchtstofflampe mit konventionellen Vorschaltgeräten wird den Quecksilberatomen die elektrische Energie hundertmal pro Sekunde (100 Hz) pulsierend zugeführt. Die Atome strahlen damit das ultraviolette Licht auch wieder pulsierend aus. Somit wird auch der Leuchtstoff an der Röhrenwand pulsierend angeregt. Die Leuchtstoffe senden das sichtbare Licht gegenüber der ultravioletten Anregung verzögert aus. Damit wird auch Licht in den Pausen der elektrischen Entladung ausgestrahlt, dies führt zu einer gewissen Verschmierung der Lichtmodulation, sie ist aber immer noch deutlich vorhanden. Wenn auch unsere Augen Lichtschwankungen von 100 Hz nicht mehr folgen können (die Grenze liegt bei etwa 20 bis 25 Hz), so stört dieser Effekt dennoch, wenn wir zum Beispiel unsere Augen schwenken oder sich Gegenstände im pulsierenden Licht bewegen. Dieser Effekt wird Stroboskopeffekt genannt. Wir werden später sehen, wie moderne Vorschaltgeräte dieses Problem lösen.

Die Leuchtstoffröhren haben spezielle elektrische Eigenschaften, denn sie verhalten sich nicht wie übliche ohmsche Widerstände. Die Leitfähigkeit einer Leuchtstofflampe wird um so besser, je mehr Ladungsträger (Elektronen und Ionen) in der Röhre vorhanden sind. Eine höhere Leitfähigkeit bedeutet aber bei konstanter Spannung eine grössere Leistungsaufnahme. Damit können wiederum mehr Ladungsträger erzeugt werden. Wird eine Leuchtstoffröhre direkt an eine Spannungsquelle angeschlossen, steigt der Strom sehr stark an, führt schliesslich zu einem Lichtbogen und zur Zerstörung der Lampe. Der Strom in der Röhre muss daher durch eine Vorrichtung begrenzt werden. Dies kann durch einen Widerstand, eine Kapazität oder eine Induktivität (Drossel) geschehen. In der Praxis wird meist eine Drossel verwendet.

Leuchtstofflampen müssen nach ihrer Lebensdauer (maximal etwa 8000 Stunden) wegen der Quecksilbergasfüllung speziell entsorgt werden. Dieses Problem ist gelöst, indem darauf spezialisierte Firmen dies heute effizient besorgen.

Notwendigkeit für ein Vorschaltgerät

Damit eine Leuchtstofflampe überhaupt betrieben werden kann, müssen also drei wesentliche Grundfunktionen erfüllt werden: Die Elektroden müssen vor dem Start aufgeheizt werden; zum Zünden der Lampe muss eine genügend grosse Spannung angelegt werden; der Strom durch die Leuchtstoffröhre muss begrenzt werden.

Diese Aufgaben hat das sogenannte Vorschaltgerät zu übernehmen. Die beiden nächsten Abschnitte sollen zeigen, wie man die Aufgabe in der Vergangenheit mit einfachen Mitteln gelöst hat und wie durch den Einsatz von intelligenter Elektronik die Effizienz, die Funktionen und die Lebensdauer von Leuchtstofflampen deutlich erhöht werden können.

Konventionelle Vorschaltgeräte

Wir haben im letzten Abschnitt gesehen, dass ein Vorschaltgerät folgende Aufgaben übernehmen muss:

- Heizung der Elektroden vor der Zündung
- Zündung der Lampe mit einer erhöhten Spannung
- Begrenzung des Entladungsstromes im Betrieb.

Eine Lösung dieser Aufgaben wurde schon früh mit den beiden Elementen Drossel und Glimmlampen-Bimetallschalter realisiert. Die Elemente sind sehr preisgünstig und einfach. Das Bild 5 zeigt die Schaltung eines solchen Vorschaltgeräts.

Eine Drossel *D* ist in Serie mit der Leuchtstofflampe *L* geschaltet. Parallel zur Lampe liegt der Glimmlampen-Bimetallstarter *G*. Das Vorschaltgerät funktioniert wie folgt: Beim Einschalten liegt die Netzspannung über die Drossel *D* an der Leuchtstofflampe und dem Glimmlampenstarter an. Diese Spannung reicht aus, um die Glimmlampe, nicht aber die Leuchtstofflampe zu zünden. Durch die Entladung wird der Bimetallstreifen im Starter erwärmt und schliesst nach kurzer Zeit den Kontakt im Starter. Nun kann ein kräftiger Strom durch die Elektroden *E* der Leuchtstofflampe fliessen und sie zum Glühen bringen. In der Zwischenzeit kühlt sich der Bimetallschalter wieder ab und öffnet den

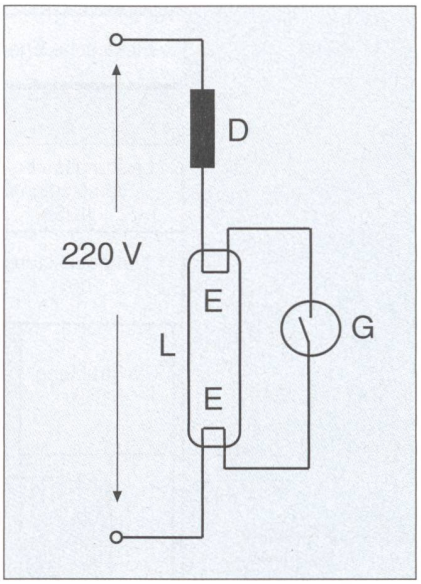

Bild 5 Leuchtstofflampe mit konventionellem Vorschaltgerät

D Drossel
G Glimmlampe mit Bimetallkontakt
L Leuchtstofflampe
E heizbare Elektroden

Kontakt. Durch den plötzlichen Stromunterbruch entsteht in der Drossel eine hohe Selbstinduktionsspannung (bis zu einigen Kilovolt), die ausreicht, um die Leuchtstofflampe zu zünden. Die Spannung über der gezündeten Leuchtstofflampe ist nun kleiner als die Zündspannung der Glimmlampe, der Bimetallschalter wird also nicht mehr erwärmt und bleibt geöffnet. Ist aber die Zündung der Lampe nicht erfolgreich, zündet die Glimmlampe erneut und es findet ein neuer Zündzyklus statt. Man beobachtet am Blinken der Lampe, dass oft zwei oder drei Zündversuche bis zum erfolgreichen Start unternommen werden.

Nachteile des einfachen Vorschaltgerätes

Wenn nun eine Leuchtstofflampe gegen das Ende ihrer Lebensdauer nicht mehr richtig gezündet werden kann, versucht das Vorschaltgerät laufend die Lampe zu zünden. Oft gelingt dies nur für kurze Zeit, und es entsteht das lästige «Blinken», das erst durch das Ersetzen der Leuchtstofflampe beseitigt werden kann. Das einfache Vorschaltgerät kann defekte Leuchtstofflampen nicht «erkennen».

Beim Heizen der Elektroden während des Startvorgangs werden die Wolframdrähte der Elektroden durch das einfache Vorschaltgerät nicht besonders schonend erhitzt. Das Aufheizen wird beendet, wenn der Bimetallschalter öffnet und nicht etwa, wenn der Heizdraht die richtige Temperatur erreicht hat. Übermässige Beanspruchung des Heizdrahtes führt jedoch zu

einer verkürzten Lebensdauer der Leuchtstofflampe.

Weil die Strombegrenzung der Leuchtstofflampe durch eine Drossel bewerkstelligt wird, entstehen induktive Blindströme im Netz. Der Blindstromfaktor beträgt typischerweise $\cos \varphi = 0{,}55$. Er ist also bedeutend. Bei der Beleuchtung grösserer Büros oder Geschäftshäuser wird darum der Blindstrom oft mit einer entsprechenden Kapazität im Vorschaltgerät kompensiert.

Dieses einfache Vorschaltgerät wurde früh erfunden und entwickelt und konnte sich dank der tiefen Kosten und seiner Einfachheit breit durchsetzen. Es hat auch heute noch eine grosse Verbreitung. In den fünfzig Jahren seit der Erfindung dieses Starters wurden mehr als 1000 Patente angemeldet, er ist aber der einfache und billige Starter geblieben (Tabelle I).

	Vorteile	Nachteile
Kosten	geringe Investitionen	Lampenlebensdauer nicht optimal (keine optimale Behandlung der Elektrodenheizung)
	vernünftige Effizienz des Vorschaltgeräts	• Lampenkosten • Wartungskosten • Entsorgungskosten (Quecksilber)
	Verschleissteile günstig im Austausch (Glimmlampen-Bimetallstarter)	Vorschaltgerät erzeugt Blindstrom Wirkungsgrad der Lampe nicht optimal
Komfort	einfacher Aufbau, wenig störanfällig	Stroboskopeffekt vorhanden, oft lästiges Blinken beim Start (mehrere Zündversuche) defekte Lampen werden nicht erkannt, es finden laufend Neuzündungen statt

Tabelle I Vor- und Nachteile des einfachen Vorschaltgeräts

Moderne elektronische Vorschaltgeräte

Ein konventionelles Vorschaltgerät löst die Grundaufgaben, es erreicht aber nicht das Optimum in bezug auf Effizienz und Komfort. An ein modernes Vorschaltgerät werden zusätzliche Anforderungen gestellt (Tabelle II). Bei grossen Betriebsdauern und vielen Ein-/Ausschalt-Zyklen kann eine längere Lampenlebensdauer klare Betriebskostenvorteile bringen. Die Verbesserung des Komforts lässt sich nicht finanziell quantifizieren, sie trägt aber zu einem angenehmeren Klima am Arbeitsort oder in Verkaufsgeschäften bei.

In modernen Vorschaltgeräten werden diese Anforderungen durch die geschickte Kombination der Hochfrequenzanregung und der gezielten Verwendung eines Schwingkreises erreicht. Die folgenden Abschnitte behandeln diese Elemente.

Hochfrequenzbetrieb

Wenn man anstelle von 50-Hz-Netzwechselstrom die Lampe mit Hochfrequenzwechselstrom (höher als 10 kHz, typisch 40 kHz) betreibt, erzielt man drei Vorteile:

• Erstens vermeidet man den sogenannten *Stroboskopeffekt*. Beim Betrieb mit 50-Hz-Netzstrom wird die Leuchtstofflampe hundertmal in der Sekunde neu gezündet. Das abgestrahlte Licht pulsiert darum mit der gleichen Frequenz, allerdings wegen der Trägheit der Leuchtstoffe mit kleiner Amplitude. Schnell bewegte Objekte werden in diesem pulsierenden Licht aber dennoch «zerhackt» wiedergegeben.

• Zweitens steigt die *Effizienz* der Leuchtstoffröhre an. Beim Betrieb mit 50-Hz-Wechselstrom vereinigen sich die für den Stromfluss notwendigen Ladungsträger wieder zu neutralen Atomen. Weil nach jeder Neuzündung diese Ladungsträger wieder mit Energieaufwand erzeugt werden müssen, sinkt die Effizienz. Bei der Verwendung von Hochfrequenzstrom ist die Zeit zwischen zwei Halbwellen genügend kurz, dass die Ladungsträger noch vorhanden sind. Damit erreicht man Effizienzsteigerungen bis zu etwa 20%.

• Drittens ist mit Hochfrequenzanregung ein *stabilerer Betrieb* der Entladung möglich, das heisst die Lampe flackert weniger.

Durch die raffinierte Verwendung und Anordnung von wenigen passiven Elementen (Drossel und Kondensator) in einem Schwingkreis kann man neben den drei erwähnten Vorteilen auch noch eine schonende und kontrollierte Heizung der Elektroden erreichen. Um die Wirkungsweise zu verstehen, werden zuerst die wesentlichen Eigenschaften des Serieschwingkreises betrachtet. Anschliessend wird gezeigt, wie die Mikroelektronik diesen Schwingkreis intelligent steuert und weitere Überwachungs- und Steueraufgaben erfüllt.

Schwingkreis

Wird eine Induktivität L (Drossel) und ein Kondensator C in Serie geschaltet, bilden sie einen sogenannten Serieschwingkreis. Bild 6 zeigt die Schaltung. Der ebenfalls in Serie geschaltete Widerstand R berücksichtigt die Widerstandsverluste in der Induktivität und der Kapazität.

Wir legen nun an einen solchen Serieschwingkreis eine Wechselspannung U_f an und beobachten die Spannungen über den drei Elementen Induktivität, Kapazität und Widerstand als Funktion der Frequenz der Wechselspannung. Die Resultate sind in Bild 7 dargestellt. Für kleine Frequenzen (Gebiet I) ist nur über der Kapazität C eine nennenswerte Spannung zu beobachten, sie ist etwa gleich gross wie die angelegte Wechselspannung U_f. Für höhere Frequenzen (Gebiet II) nimmt die Spannung U_C über dem Kondensator zu, gleichzeitig aber auch die Spannungen über der Induktivität U_L und dem Widerstand U_R. Für eine bestimmte Frequenz, die sogenannte Resonanz- oder Schwingfrequenz des Schwingkreises, werden die drei Spannungen maxi-

Effizienz	Ausnutzung der maximalen Effizienz der Leuchtstofflampe möglichst hohe Effizienz des Vorschaltgeräts
Komfort	kurzer, sauberer Start (gute, korrekte Wendelvorheizung) defekte Lampen werden erkannt, ein Neustart wird verhindert kein Stroboskopeffekt sichere Zündung über einen grossen Temperaturbereich
Lebensdauer	schonende Behandlung der Lampe, möglichst grosse Lebensdauer Leistungsstabilisierung (Netzspannungsschwankungen) grosse Zuverlässigkeit des Vorschaltgeräts Konstanthaltung der Leistungsaufnahme
Sicherheit	Temperaturüberwachung Verhinderung von abnormalen Lastzuständen Schutz der elektronischen Schaltung vor Überströmen und Kapazitivlast Abschaltung bei Unterspannung
EMV	kleiner Oberwellengehalt im Strom minimale Störstrahlung

Tabelle II Anforderungen an ein modernes Vorschaltgerät

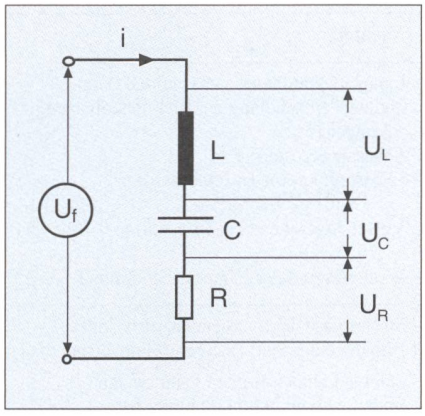

Bild 6 Serieschwingkreis

L Selbstinduktion (Drossel)
C Kondensator
R Widerstand

mal. Die einzelnen Spannungen U_C und U_L sind bei dieser Frequenz deutlich grösser als die angelegte Spannung U_f. Für noch grössere Frequenzen (Gebiet III) kehrt sich das Bild gegenüber dem Gebiet I um: Nun ist die angelegte Spannung im wesentlichen über der Induktivität *L* zu beobachten, während die Spannungen über der Kapazität und dem Widerstand für zunehmende Frequenzen immer mehr abnehmen.

Für unsere Anwendung in einem Vorschaltgerät sind besonders das Gebiet III und der obere Teil des Gebiets II interessant. Hier kann man durch geeignete Wahl der Frequenz den Strom im Schwingkreis und die Spannung über dem Kondensator einstellen. Der Strom wird für die Heizung benötigt, mit der Spannung soll die Zündung der Lampe erreicht werden.

Lampe mit Schwingkreis

Die Leuchtstoffröhre wird nun wie Bild 8 zeigt in den Serieschwingkreis geschaltet. Dabei sind die beiden Heizwendel der Elektroden in Serie mit der Induktivität und dem Kondensator geschaltet, sie stellen den Widerstand des Schwingkreises dar. Die beiden Elektroden sind aber durch den Kondensator getrennt, zwischen ihnen kann also die Kondensatorspannung U_C liegen. Die drei Funktionen Heizung, Zündung und Betrieb werden nun durch die Wahl der Wechselstromfrequenz erreicht. Die drei Phasen laufen wie folgt ab (Bilder 8 und 9):

Heizung: Die Frequenz f_1 der Wechselspannung liegt deutlich über der Resonanzfrequenz des Schwingkreises. Es fliesst ein Strom, der die Heizwendel der Lampe erhitzt und zum Glühen bringt. Die Spannung U_f liegt fast vollständig über der Induktivität *L*; über der Kapazität und somit auch über der Lampe liegt nur eine kleine Spannung an, die nicht zur Zündung ausreicht.

Zündung: Wenn die richtige Temperatur der Heizwendel erreicht ist, wird die tiefere Frequenz f_2 eingestellt. Sie liegt immer noch über der Resonanzfrequenz. Durch die Wirkung des Schwingkreises in Resonanznähe nimmt nun die Spannung über der Kapazität wesentlich zu und kann deutlich grösser als die anregende Spannung U_f werden; damit ist die Zündung der Lampe möglich.

Betrieb: Nach der Zündung wird die Frequenz auf die Betriebsfrequenz f_3 gesenkt. Die gezündete Lampe stellt nun einen Widerstand parallel zum Kondensator des Schwingkreises dar. Damit wird der Schwingkreis stark gedämpft, über der Lampe liegt nun etwa die Hälfte der angelegten Wechselspannung. Die Induktivität *L* wirkt als Strombegrenzer und stabilisiert den Strom durch die Lampe. Die Leistung der Lampe kann nun durch Variation der Frequenz geregelt werden. So wird die Leistung vermindert, wenn man die Frequenz erhöht, weil dadurch der Wechselstromwiderstand der Drossel steigt und den Vorwiderstand erhöht, während der Wechselstromwiderstand der Kapazität sinkt und damit einen zunehmenden «Kurzschluss» über der Lampe darstellt.

Die Grundfunktionen des Vorschaltgeräts – Heizen, Zünden und Betrieb – können somit in der Schaltung mit dem Serieschwingkreis durch eine einfache Kontrolle der Frequenz der angelegten Spannung erreicht werden. Diese Aufgabe wird durch eine Steuerelektronik erfüllt, die den momentanen Zustand der Lampe erkennt und daraus die richtigen Frequenzen und Steuersignale erzeugt.

Modernes Vorschaltgerät mit Steuerelektronik

Bild 10 zeigt das Blockschaltbild eines mit einer kundenspezifischen integrierten Schaltung realisierten Vorschaltgeräts. Man erkennt darin wieder den Serieschwingkreis, bestehend aus den Elementen Drossel *(5)*, Kapazität *(7)* und der Leuchtstofflampe *(6)*. Die hochfrequente Spannung wird vom Wechselrichter *(4)* an den Schwingkreis geliefert. Dieser Wechselrichter erzeugt die hochfrequente Wechselspannung aus der Gleichspannung des Zwischenkreises, bestehend aus Gleichrichter *(2)* und Glättungskondensator *(3)*. Die Frequenz der Wechselspannung wird durch die Steuerelektronik *(9)* als Steuersignal an den Wechselrichter *(4)* gegeben. Der Wechselrichter ist eigentlich ein Verstärker (Spannung und Leistung) für das Steuersignal der Steuerelektronik. Die Steuerelektronik führt nun folgende Funktionen aus:

Heizphase: Die Frequenz des Wechselrichters wird deutlich oberhalb der Resonanzfrequenz gewählt. Dabei wird die Frequenz vorerst so gesteuert, dass über dem Widerstand *(8)* eine vorgegebene Spannung abfällt; der Strom durch die Heizwendel ist damit konstant. Der Spannungsabfall über der Kathode der Leuchtstofflampe wird zu Beginn des Heizvorganges gemessen und gespeichert. Durch die Temperaturerhöhung des Heizwendels steigt auch dessen Widerstand. Dadurch würde der Strom durch die Heizwendel schwächer. Die Steuerelektronik verkleinert daher die Frequenz der Wechselspannung; man nähert sich mehr der Resonanzfrequenz, und die Ströme werden wieder grösser. So wird der Strom in den Heizwendeln konstant gehalten. Mit konstantem Strom durch den Wendel ist aber der Spannungsabfall direkt proportional zum Widerstand der Wendel und kann so

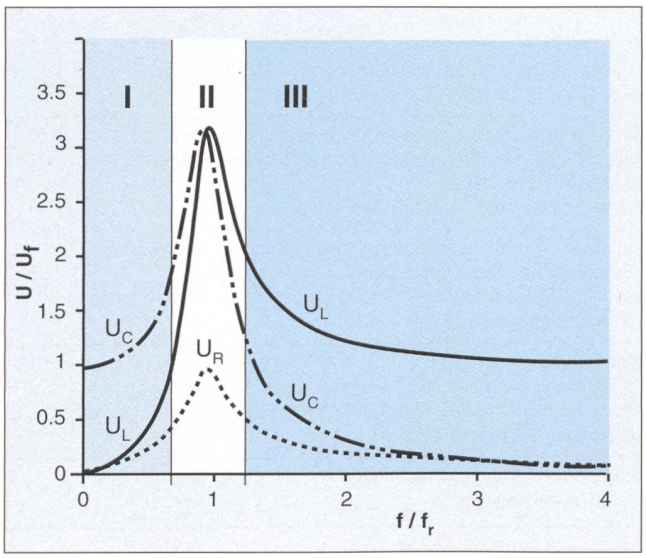

Bild 7 Spannungen und Strom im Serieschwingkreis

f/f_r Frequenz, bezogen auf die Resonanzfrequenz f_r
U/U_f Spannungen, bezogen auf die angelegte Spannung U_f
U_C Spannung am Kondensator
U_L Spannung an der Drossel
U_R Spannungsabfall am Widerstand; er ist ein Mass für den Strom: $i = U_R/R$

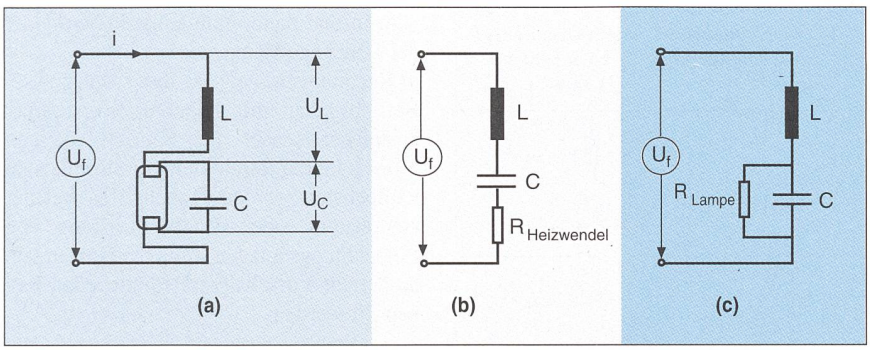

Bild 8 Serieschwingkreis mit Leuchtstoffröhre

a Schaltschema *b* Ersatzschaltbild beim Heizen *c* Ersatzschaltbild im Betrieb

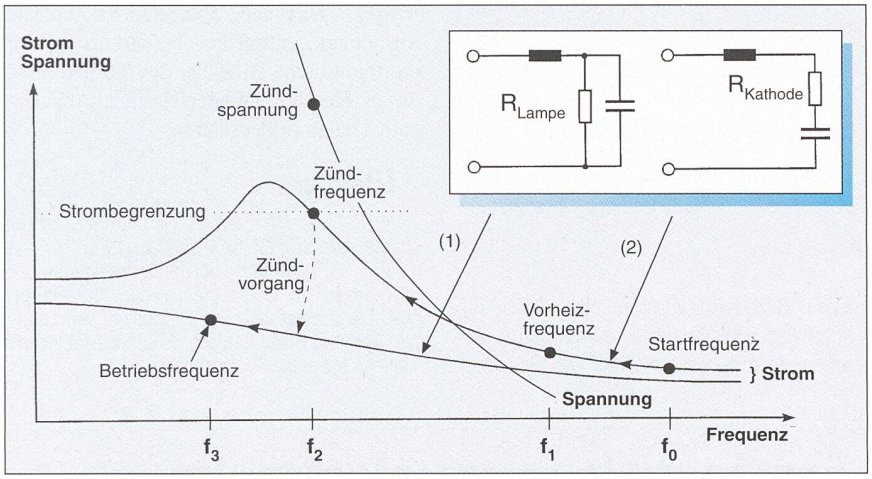

Bild 9 Strom-Frequenz- und Spannung-Frequenz-Diagramm für Heizung, Zündung und Betrieb

f_0 Startfrequenz
f_1 Vorheizfrequenz
f_2 Zündfrequenz
f_3 Betriebsfrequenz
1 Kennlinie mit gezündeter Lampe
2 Kennlinie mit nicht gezündeter Lampe

zur Temperaturmessung verwendet werden. Der Heizvorgang ist beendet, wenn die Spannung (und damit der Widerstand) gegenüber der Startspannung um etwa einen Faktor 3 gewachsen ist, entsprechend etwa einer Wendeltemperatur von 800 Grad Celsius. Mit diesem Vorgang, der rund zwei Sekunden dauert, ist ein genaues Vorheizen möglich. Nun beginnt die Zündphase.

Zündphase: Die Frequenz des Wechselrichters wird gesenkt und der Resonanzfrequenz des Schwingkreises genähert. Dadurch steigt die Spannung über der Kapazität und der dazu parallel liegenden Leuchtstofflampe stark an: Die Zündspannung wird erreicht, die Lampe zündet. Weil der Heizstrom durch die Wendel bei Annäherung an die Resonanzfrequenz ebenfalls sehr stark steigt, wird er überwacht und in dieser Phase auf einen Maximalwert begrenzt. Die Lampe befindet sich jetzt in der Betriebsphase.

Betriebsphase: Der Schwingkreis ist nun durch den Lampenwiderstand stark gedämpft. Durch Steuerung der Frequenz erreicht man die erwünschte Regelung der Leistung im Betrieb. Zusätzlich zu diesen Aufgaben erfüllt die beschriebene Steuerelektronik folgende weitere Funktionen:

- Temperaturüberwachung des Vorschaltgeräts
- Deaktivierung für nicht zündende Lampen
- Erkennung eines Lampenwechsels und eines Netzunterbruchs
- definierte Ein- und Ausschaltschwellen
- Verhinderung von abnormalen Lastzuständen
- Überwachung der Gleichspannung im Zwischenkreis.

Der Nutzen der Mikroelektronik für den Hersteller ...

Die Steuerelektronik elektronischer Vorschaltgeräte wurde bisher konventionell mit diskreten und integrierten Schaltelementen aufgebaut. Es zeigt sich aber, dass durch die Entwicklung und Verwendung einer kundenspezifischen integrierten Schaltung, die möglichst viele Funktionen auf einem Chip integriert, die Anzahl der Elemente in solchen Vorschaltgeräten und damit ihr Volumen reduziert werden können. Durch die Wahl eines geeigneten Semi-Custom-Asic können sowohl analoge (z. B. Spannungsmessung, Spannungsreferenzquellen oder Stromquellen) als auch digitale Funktionen (z. B. logische Verknüpfungen, Timer) auf dem gleichen Chip realisiert werden. Alle Steuer- und Messfunktionen (Bild 10) können so im gleichen integrierten Baustein untergebracht werden. Diesen Weg beschritt das Glarner Unternehmen Knobel (siehe auch [1]). Damit war eine Produkteerneuerung möglich, die es dem Unternehmen erlaubt, sich mit gesenkten Kosten auch auf dem Exportmarkt zu behaupten.

... und der Nutzen des Anwenders

Wo liegt nun der Nutzen für den Anwender? Tatsächlich entstehen bei der Ausrüstung einer Beleuchtung mit modernen elektronischen Vorschaltgeräten vorerst

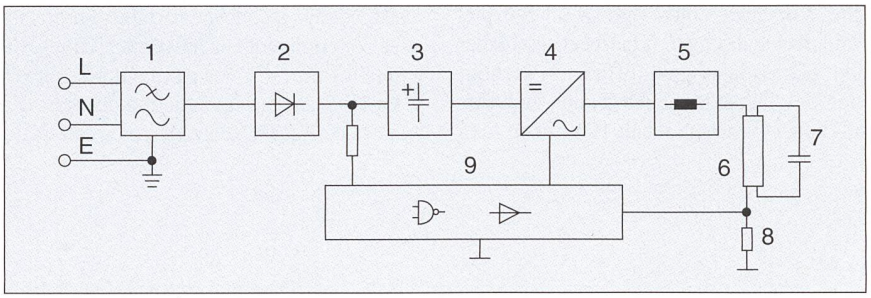

Bild 10 Blockschaltbild eines elektronischen Vorschaltgeräts

1 Netzfilter (Oberwellen- und Funkentstörung)
2 Gleichrichter
3 Glättungskondensator
4 Wechselrichter
5 Drossel
6 Leuchtstofflampe
7 Kondensator
8 Messwiderstand für den Heizstrom bzw. Lampenstrom
9 Steuerelektronik mit kundenspezifischem integriertem Schaltkreis (Asic)

	Konventionelles Vorschaltgerät (KVG)	Elektronisches Vorschaltgerät (EVG)
Preis für Vorschaltgerät (2 St.) Variante 1 Preis für Duo-Vorschaltgerät Variante 2	41 Fr. (41 Fr.)	170 Fr. 92 Fr.
Differenz der Investitionskosten Variante 1 Differenz der Investitionskosten Variante 2	0 Fr.	+129 Fr. + 51 Fr.
Anschlussleistung (für gleichen Lichtstrom) Stromkosten/Jahr (0.13 Fr./kWh) Lampenersatzkosten/Jahr (Lampenersatz, Auswechseln, Entsorgung)	96 W 109.30 Fr./a 37.50 Fr./a (8000 h)	75 W 85.40 Fr./a 16.70 Fr./a (18 000 h)
Betriebskosten/Jahr Kostendifferenz gegenüber KVG (Variante 1 und 2)	146.80 Fr./a 0 Fr.	102.10 Fr./a –44.70 Fr./a
Pay-Back-Zeit für erhöhte Investition, Variante 1 **Pay-Back-Zeit für erhöhte Investition, Variante 2**		**2,9 a** **1,2 a**

Tabelle III Wirtschaftlichkeitsrechnung

Annahmen Variante 1: zwei 36-W-Leuchten während 24 h/Tag, 365 Tage/Jahr; die Pay-Back-Zeit für erhöhte Investition errechnet sich zu 129 Fr. / (44.70 Fr./a) = 2,9 a.
Annahmen Variante 2: eine 36-W-Leuchte zweiflammig während 24 h/Tag, 365 Tage/Jahr (NB: KVG für zweiflammige Leuchte nicht erhältlich); die Pay-Back-Zeit für erhöhte Investition errechnet sich zu 51 Fr. / (44.70 Fr./a) = 1,2 a.

grössere Investitionskosten. Dank verschiedenen Verbesserungen und tieferen Betriebskosten werden diese rasch wieder zurückbezahlt, sowohl in Fällen grosser Schalthäufigkeit als auch bei Dauerbetrieb.

Grosse Schalthäufigkeit: Die Lampe erträgt mehr als 50000 Ein-/Ausschalt-Vorgänge und erreicht trotzdem die maximale Lebensdauer von etwa 8000 Stunden. Der Gewinn liegt in minimalen Lampenkosten und minimalen Unterhaltskosten (weniger Austauschkosten).

Dauerbetrieb: Effizienzsteigerung durch Hochfrequenzbetrieb. Der Gewinn zeigt sich in reduzierten Stromenergiekosten. Dazu kommen die zusätzlichen Vorteile des Komforts und der Sicherheit sowie Beiträge zur Reduktion des Energieverbrauchs und der Stoffflüsse bei der Produktion und der Entsorgung der Lampen.

Einsatzgebiete für moderne elektronische Vorschaltgeräte sind zum Beispiel Tunnelbeleuchtungen (Dauerbetrieb, daher sind Lebensdauer und Effizienz wichtig) oder Geschäftshäuser. Aber auch an Orten mit hoher Ein-/Ausschalt-Häufigkeit und kurzen Betriebsdauern machen sich die Vorschaltgeräte bezahlt, denn damit erreicht man eine grosse Zahl von Startvorgängen und damit eine lange Lebensdauer der Leuchtstofflampe.

Rechnungen zeigen, dass bei grosser Betriebsdauer die höheren Investitionskosten bereits nach einer Betriebsdauer von 1 bis 3 Jahren durch kleinere Stromkosten kompensiert werden (Tabelle III). Bei der Neuplanung oder der Nachrüstung von Beleuchtungsanlagen sollte der Nutzen von modernen Vorschaltgeräten auf jeden Fall geprüft werden.

Verdankung und Schlussbemerkung

Der Autor dankt den Herren *Felix Tobler* (Firma Knobel, Ennenda GL) und *Walter Hammer* (Microswiss-Zentrum Mittelland-Zentralschweiz, Grenchen) für die freundliche Hilfe bei der Vorbereitung dieses Beitrags. Weiterführende Angaben zum Thema findet man in [2].

Literatur

[1] *E. Flury:* Mikrotechnik als unternehmerische Chance. Bull. SEV/VSE 87(1996)1, S. 11–16.

[2] *C. H. Sturm* und *E. Klein:* Betriebsgeräte und Schaltungen für elektrische Lampen. Vorschaltgeräte, Transformatoren, Starter, Lampen und Leuchten, Normen. Hrsg.: E. Klein, 6. Auflage. München: Siemens Aktiengesellschaft 1992.

Entrée de la micro-électronique dans les techniques de l'éclairage

Les ballasts modernes pour lampes fluorescentes réduisent les frais et la consommation d'énergie

Les lampes fluorescentes, pour leur fonctionnement, ont besoin de ballasts, qui d'une part assurent l'allumage des lampes, de l'autre en limitent le courant de décharge. Ces derniers temps les ballasts classiques avec self et interrupteur bimétallique à lampe au néon, utilisés depuis de nombreuses années, sont remplacés de plus en plus par des ballasts électroniques. Dans le présent article on compare les anciennes et les nouvelles technologies sur les plans technique et économique.

Après une comparaison de l'efficacité énergétique des lampes à incandescence (figure 1) avec celle des lampes fluorescentes (figures 3 et 4) on explique le fonctionnement des lampes fluorescentes et des ballasts classiques (figures 2 et 5). On montre ensuite comment les ballasts modernes dotés d'un circuit résonnant série, qui est excité à fréquence variable, amorcent les lampes fluorescentes de manière simple, et les commandent en service (figures 6–10). Des analyses de rentabilité montrent que les frais d'investissement plus élevés pour les ballasts électroniques sont amortis en 1 à 3 ans par la réduction des frais d'exploitation (tableau III).