

Grundlagenreihe Stromversorgungen und Verbraucher besonderer Art – Teil 8

Beleuchtungsstromkreise

Glühlampen mit direkter Stromversorgung

Aufgrund der sehr hohen Drahttemperatur bei eingeschalteter Lampe (bis 2500°C) ändert sich der Drahtwiderstand erheblich mit Ein- und Ausschalten der Lampe. Da der Kaltwiderstand niedrig ist, tritt beim Einschalten eine Stromspitze auf, die für einige Millisekunden oder sogar länger das 10- bis 15fache des Nennstroms erreichen kann.

Dieser Nachteil betrifft sowohl normale Lampen als auch Halogenlampen: Er führt zu einer Reduzierung der maximalen Lampenanzahl, die von Geräten, wie z.B. einem Fernschalter, modularen Schützen und Relais im Verteiler versorgt werden.

Niedervolt-Halogenlampen

- Einige Niedervolt-Halogenlampen werden über einen Transformator oder ein elektronisch getaktetes Netzteil mit niedriger Spannung versorgt (12 oder 24 V). Bei Einsatz eines Transformators treten sowohl die Auswirkungen der Magnetisierung als auch der Veränderung des Drahtwiderstands beim Einschalten auf.

Der Einschaltstrom kann für einige Millisekunden das 50- bis 75-fache des Nennstroms erreichen. Durch die Verwendung von vorgeschalteten Dimmerschaltern wird dieser Strom erheblich verringert.

- Elektronisch getaktete Netzteile mit der gleichen Bemessungsleistung sind kostspieliger als Transformatorlösungen. Dieser wirtschaftliche Nachteil wird ausgeglichen durch einfacheren Einbau und Anwendung, da die getakteten Netzteile durch deren niedrige Wärmeableitung auch auf einem brennbaren Untergrund befestigt werden können. Zudem verfügen sie im Allgemeinen über einen integrierten thermischen Schutz.

Momentan sind neue Niedervolt-Halogenlampen mit in der Grundausführung integriertem Transformator erhältlich. Diese können direkt über das NS-Netz gespeist werden und können normale Lampen ohne besondere Anpassungen ersetzen.

Dimmen von Glühlampen

Eine Glühlampe kann durch Verändern der an die Lampe angelegten Spannung gedimmt werden.

Diese Spannungsänderung wird im Allgemeinen mit einem Triac-Dimmerschalter durchgeführt, indem dessen Zündwinkel in der Netzspannungsperiode verändert wird. Die Schwingungsform der an die Lampe angelegten Spannung wird in **Abbildung N38a** dargestellt. Diese Technik wird als „Phasenanschnittsteuerung“ bezeichnet und ist für die Spannungsversorgung von Ohmschen oder induktiven Stromkreisen geeignet. Eine andere Technik ist für die Spannungsversorgung von kapazitiven Stromkreisen geeignet und wurde mit elektronischen MOS- oder IGBT-Komponenten entwickelt. Bei dieser Technik wird die Spannung durch Ausschalten des Stroms vor Ende der Halbperiode verändert (siehe **Abb. N38b**). Sie wird als „Phasenabschnittsteuerung“ bezeichnet.

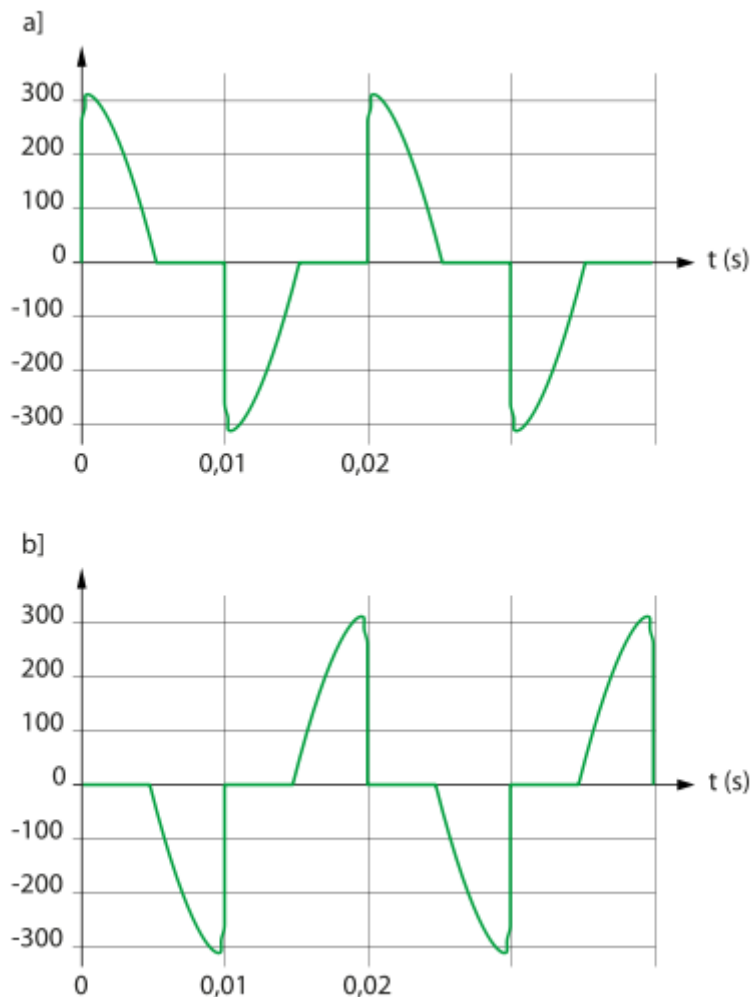


Abb. N38: Form der über einen Lichtdimmer gelieferten Spannung bei 50 % der Höchstspannung mit Hilfe folgender Techniken:

a) „Phasenanschnittsteuerung“

b) „Phasenabschnittsteuerung“

Das kontrollierte Einschalten der Lampe kann ebenso zu einer Verringerung oder sogar zur Beseitigung der Einschaltstromspitze führen.

Da der Lampenstrom durch die elektronischen Schaltgeräte verzerrt wird, werden Oberschwingungsströme erzeugt. Es überwiegen die Oberschwingungsströme der 3. Ordnung und der prozentuale Anteil der Oberschwingungsströme der 3. Ordnung bezogen auf den maximalen Strom der Grundschwingung (bei maximaler Leistung) wird in **Abbildung N39** dargestellt.

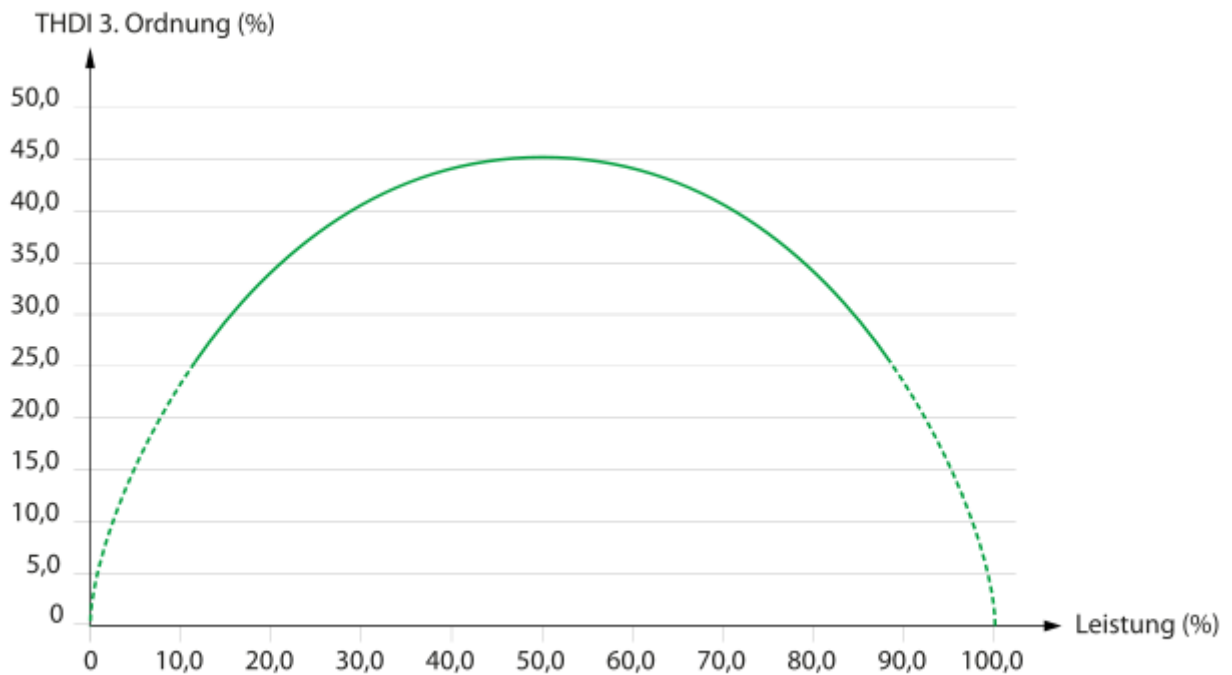


Abb. N39: Prozentualer Anteil der Oberschwingungsströme der 3. Ordnung bezogen auf die Glühlampenleistung unter Verwendung eines elektronischen Dimmerschalters

Es sei darauf hingewiesen, dass die über einen Dimmerschalter gelieferte Lampenleistung in der Praxis nur zwischen 15 und 85 % der maximalen Lampenleistung betragen kann.

Nach IEC 61000-3-2 (VDE 0838-2) gelten für Oberschwingungsströme, die von elektrischen oder elektronischen Geräten mit einem Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter verursacht werden, folgende Festlegungen:

- Für unabhängige Dimmer für Glühlampen mit einer Bemessungsleistung kleiner oder gleich 1 kW gelten keine Grenzwerte.
- Anderenfalls oder für Leuchten mit Glühlampen und integriertem Dimmer oder in ein Gehäuse integriertem Dimmer beträgt der maximal zulässige Oberschwingungsstrom der 3. Ordnung 2,30 A.

Leuchtstofflampen mit magnetischem Vorschaltgerät

Röhrenförmige Leuchtstofflampen und Entladungslampen erfordern eine Begrenzung des Lichtbogenstroms. Diese Funktion wird von einer Induktivität übernommen (oder von einem magnetischen Vorschaltgerät), die in Reihe mit dem Kolben selbst geschaltet wird (siehe **Abb. N40**).

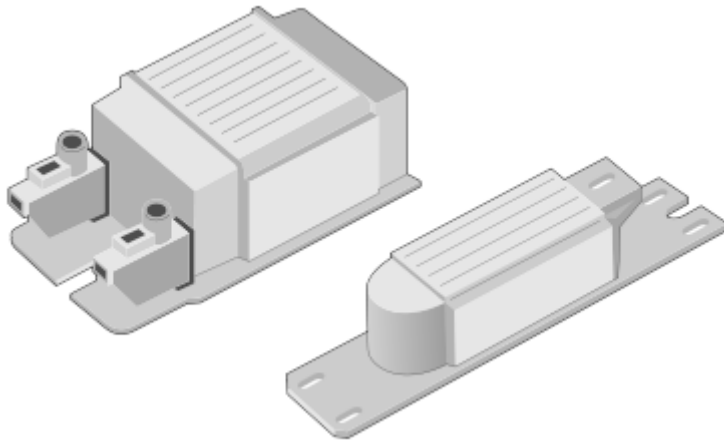


Abb. N40: Magnetische verlustarme Vorschaltgeräte (VVG)

Diese Anordnung wird meistens in Haushaltsanwendungen mit einer begrenzten Anzahl an Lampen eingesetzt. Für die Schalter gelten keine besonderen Einschränkungen.

Dimmerschalter sind nicht mit magnetischen Vorschaltgeräten kombinierbar:

Das Ausschalten der Spannung führt zu einer Unterbrechung der Entladung und somit zu einer vollständigen Erlöschung der Lampe.

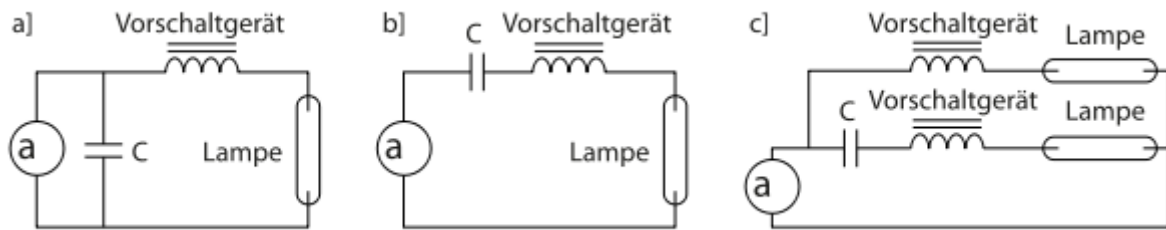
Der Starter hat zwei Funktionen: Das Vorheizen der Röhrenelektroden und anschließend die Erzeugung einer Überspannung zur Zündung der Lampe.

Diese Überspannung wird durch Öffnen eines (über einen thermischen Schalter gesteuerten) Kontaktes erzeugt, wodurch der Stromfluss im magnetischen Vorschaltgerät unterbrochen wird.

Während des Starterbetriebs (ca. 1 s) ist der von der Leuchte aufgenommene Strom etwa doppelt so hoch wie der Nennstrom.

Da der von der Lampe und vom Vorschaltgerät aufgenommene Strom induktiv ist, ist der Leistungsfaktor sehr niedrig (er liegt im Durchschnitt zwischen 0,4 und 0,5). In Anlagen mit einer großen Anzahl an Lampen ist eine Blindleistungskompensation notwendig, um den Leistungsfaktor zu erhöhen.

Für große Beleuchtungsanlagen ist eine Zentralkompensation mit Kondensatormodulen eine mögliche Lösung, häufiger wird jedoch in der Beleuchtungsanlage jede zweite Leuchte mit einem Kompensationskondensator ausgestattet. Es sind verschiedene Anordnungen möglich (s. **Abb. N41**).



Kompensationsanordnung	Anwendung	Anmerkungen
Ohne Kompensation	Haushalt	Einfacher Anschluss
Parallelschaltung [a]	Büros, Werkstätten, Großmärkte	Risiko von Überströmen für Steuergeräte
Reihenschaltung [b]		Kondensatoren mit hoher Betriebsspannung wählen (450 bis 480 V)
Duo-Schaltung [c]		Vermeidung von Flimmern

Abb. N41: Versch. Kompensationsanordnungen: **a)** Parallelschaltung; **b)** Reihenschaltung; **c)** „Duo-Schaltung“ (zweifache Reihenschaltung) und Anwendungsbereiche]]

Die Kompensationskondensatoren sind so zu dimensionieren, dass der Gesamtleistungsfaktor über 0,85 liegt. In dem am häufigsten eingesetzten Fall der Parallelkompensation beträgt die Kapazität durchschnittlich 1 μF für 10 W Wirkleistung und jeden beliebigen Lampentyp. Dennoch ist diese Kompensation nicht mit Dimmerschaltern kombinierbar.

Einschränkungen bei der Kompensation

Die Anordnung für die Parallelkompensation führt zu Einschränkungen bezüglich der Zündung der Lampe. Da der Kondensator anfangs entladen ist, wird beim Einschalten ein Überstrom erzeugt. Ebenso tritt aufgrund der Schwingungen im Stromkreis durch den Kondensator und die Netzinduktivität eine Überspannung auf.

Das folgende Beispiel dient als Berechnungshilfe für die Stromstärken.

Bsp.: 50 röhrenförmige Leuchtstofflampen mit jeweils 36 W:

- Gesamtwirkleistung: 1800 W
- Scheinleistung: 2 kVA
- Gesamt-Effektivstrom: 9 A
- Spitzenstrom: 13 A; mit:
- einer Gesamtkapazität: $C = 175 \mu\text{F}$
- einer Netzinduktivität (entspricht einem Kurzschlussstrom von 5 kA): $L = 150 \mu\text{H}$

Der maximale Einschaltspitzenstrom beträgt:

$$I_c = U_{max} \sqrt{\frac{C}{L}} = 230\sqrt{2} \sqrt{\frac{175 \times 10^{-6}}{150 \times 10^{-6}}} = 350 \text{ A}$$

Der theoretische Einschaltspitzenstrom kann daher das **27-fache** des Spitzenstroms bei Normalbetrieb erreichen.

Abb. N42 enthält die Einschaltspannungs- und Einschaltstromform bei Schließen des Schalters im Moment der Netzspannungsspitze.

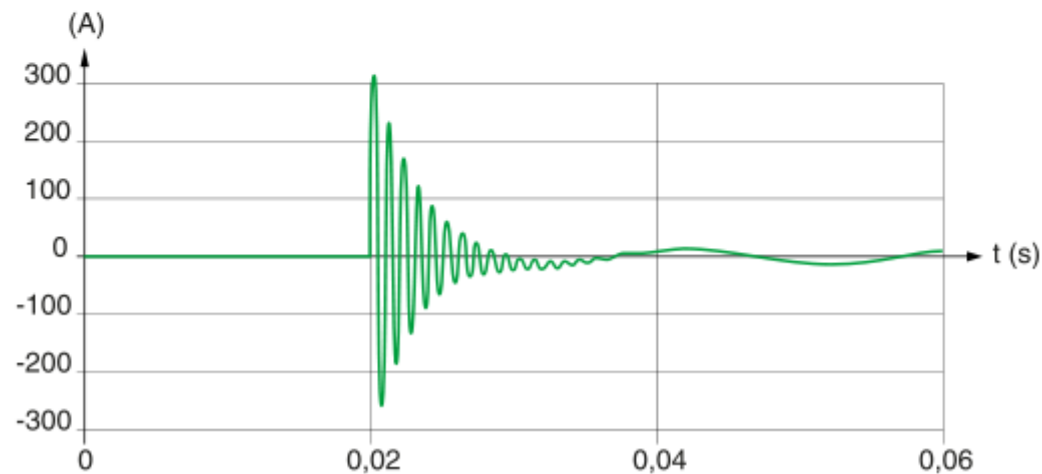
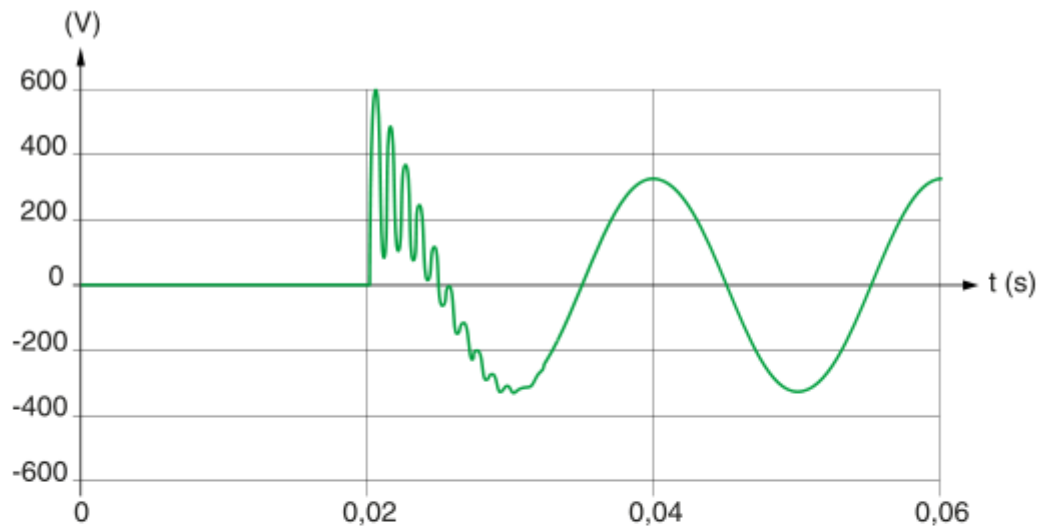


Abb. N42: Versorgungsspannung beim Einschalten und Einschaltstrom

Es besteht daher das Risiko einer Kontaktverschmelzung in elektromechanischen Steuergeräten (Fernschalter, Schütz, Leistungsschalter) oder der Zerstörung von Schaltern mit Halbleiterkomponenten. Tatsächlich sind die Einschränkungen aufgrund der Leitungsimpedanzen nicht allzu stark.

Das gruppenweise Einschalten von röhrenförmigen Leuchtstofflampen beinhaltet eine spezielle Einschränkung. Ist eine Lampengruppe bereits eingeschaltet, sind die Kompensationskondensatoren in diesen bereits eingeschalteten Lampen auch von dem Einschaltstrom im Einschaltmoment einer zweiten Lampengruppe betroffen:

Sie „verstärken“ die Stromspitze im Steuerschalter im Einschaltmoment der zweiten Gruppe.

Die Tabelle in **Abb. N43** enthält Messwerte und gibt die Größe der ersten Stromspitze für verschiedene Werte des prospektiven Kurzschlussstroms I_k an. Es ist zu sehen, dass die

Stromspitze mit 2 oder 3 multipliziert werden kann, je nach Anzahl der bereits verwendeten Lampen im Anschaltmoment der letzten Lampengruppe.

Anzahl bereits verwendeter Lampen	Anzahl angeschlossener Lampen	Einschaltstromspitze (A)		
		$I_k = 1500 \text{ A}$	$I_k = 3000 \text{ A}$	$I_k = 6000 \text{ A}$
0	14	233	250	320
14	14	558	556	575
28	14	608	607	624
42	14	618	616	632

Abb. N43: Größe der Stromspitze im Steuerschalter im Einschaltmoment einer zweiten Lampengruppe

Trotzdem wird ein sequentielles Einschalten jeder Lampengruppe empfohlen, um die Stromspitze im Hauptschalter zu reduzieren. Die neueren magnetischen Vorschaltgeräte werden als „verlustarm“ bezeichnet.

Der magnetische Stromkreis wurde optimiert, das Funktionsprinzip bleibt jedoch dasselbe. Diese Vorschaltgeräte-Generation wird immer häufiger zum Einsatz kommen, jedoch auch neuen Vorschriften unterliegen (EG-Richtlinie, Energy Policy Act - USA).

Heutzutage werden immer häufiger elektronische Vorschaltgeräte (EVGs) eingesetzt anstelle der magnetischen verlustarmen Vorschaltgeräte (VVGs).

Leuchtstofflampen mit elektronischem Vorschaltgerät

Elektronische Vorschaltgeräte werden als Ersatz von magnetischen Vorschaltgeräten zur Spannungsversorgung von röhrenförmigen Leuchtstofflampen (einschließlich Kompakt-Leuchtstofflampen) und Entladungslampen verwendet. Sie übernehmen ebenso die „Starter“-Funktion und benötigen kein Kompensationsvermögen.

Das Funktionsprinzip des elektronischen Vorschaltgerätes (siehe **Abb. N44**) besteht in der Versorgung des Lampenlichtbogens über ein elektronisches Gerät, das eine rechteckige Wechselspannung mit einer Frequenz zwischen 20 und 60 kHz erzeugt.

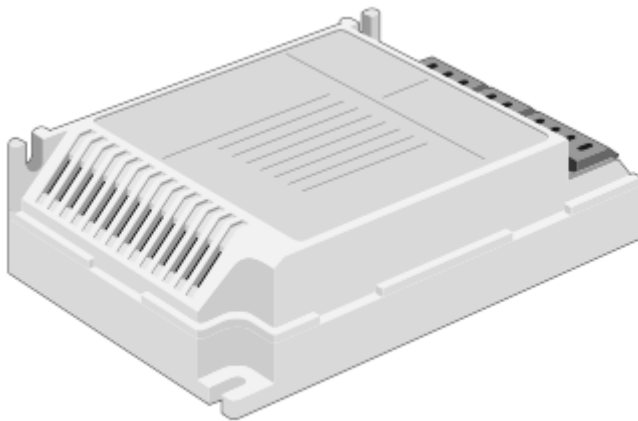


Abb. N44: Elektronisches Vorschaltgerät (EVG)

Die Versorgung des Lichtbogens mit einer hochfrequenten Spannung kann das Flimmern und den Stroboskop-Effekt vollständig beseitigen. Das elektronische Vorschaltgerät ist vollkommen geräuschlos.

Während der Vorheizphase einer Entladungslampe versorgt dieses Vorschaltgerät die Lampe mit einer ansteigenden Spannung, was einen nahezu konstanten Strom erfordert. Im Dauerbetrieb regelt es die an der Lampe anliegende Spannung unabhängig von jeglichen Netzspannungsschwankungen.

Da der Lichtbogen unter optimalen Spannungsbedingungen versorgt wird, erhält man eine Energieeinsparung von 5 bis 10 % und eine längere Lebensdauer der Lampe. Darüber hinaus kann der Wirkungsgrad des elektronischen Vorschaltgerätes 93 % überschreiten, wohingegen der durchschnittliche Wirkungsgrad eines magnetischen verlustarmen Vorschaltgerätes nur 85 % beträgt.

Der Leistungsfaktor ist hoch ($> 0,9$).

Das elektronische Vorschaltgerät wird ebenso zur Lichtdimmung verwendet. Durch Verändern der Frequenz wird die Stromstärke im Lichtbogen verändert und demzufolge die Lichtstärke.

Einschaltstrom

Der Hauptnachteil elektronischer Vorschaltgeräte im Hinblick auf die Netzversorgung ist der hohe Einschaltstrom in Verbindung mit der Anfangslast der Glättungskondensatoren (siehe **Abb. N45**).

Technik	Maximaler Einschaltstrom	Dauer
Gleichrichter mit Kondensator	30 bis 100 I_n	≤ 1 ms
Gleichrichter mit Induktivität	10 bis 30 I_n	≤ 5 ms
Magnetisches Vorschaltgerät	$\leq 13 I_n$	5 bis 10 ms

Abb. N45: Höchstwerte des Einschaltstromes, abhängig von der verwendeten Technik

Tatsächlich sind aufgrund der Leitungsimpedanzen die Einschaltströme für eine Lampengruppe viel niedriger als diese Werte (ca. 5 bis 10 I_n für weniger als 5 ms).

Im Gegensatz zu magnetischen Vorschaltgeräten tritt dieser Einschaltstrom nicht in Zusammenhang mit einer Überspannung auf.

Oberschwingungsströme

Bei Vorschaltgeräten, die mit Hochleistungs-Entladungslampen kombiniert sind, enthält der aus dem Netz aufgenommene Strom eine niedrige gesamte harmonische Verzerrung (i. Allg. $< 20\%$ und für die meisten anspruchsvollen Geräte $< 10\%$). Hingegen nehmen Geräte, die mit Niedervolt-Lampen kombiniert sind, besonders Kompakt-Leuchtstofflampen, einen stark verzerrten Strom auf (siehe **Abb. N46**).



Abb. N46: Form des von einer Kompakt-Leuchtstofflampe aufgenommenen Stroms

Die gesamte harmonische Verzerrung kann bis zu 150 % betragen. Unter diesen Bedingungen beträgt der aus dem Netz aufgenommene Effektivstrom das 1,8-fache des Stroms, der der Wirkleistung der Lampe entspricht. Dies entspricht einem Leistungsfaktor von 0,55.

Um die Last zwischen den verschiedenen Außenleitern auszugleichen, werden Beleuchtungsstromkreise im Allgemeinen symmetrisch zwischen den Außenleitern und dem Neutralleiter angeschlossen. Unter diesen Bedingungen können die hohen Werte der Oberschwingungen der Ordnung $\sqrt{3}$ und Vielfachen von 3 zu einer Überlast des Neutralleiters führen. Im ungünstigsten Fall tritt ein Neutralleiterstrom auf, der das 3fache des Stroms in jedem Außenleiter erreicht.

Grenzwerte für Störemissionen durch Oberschwingungen für elektrische oder elektronische Systeme sind in der IEC 61000-3-2 (VDE 0838-2) festgelegt. Zur Vereinfachung werden die Grenzwerte für Leuchtmittel hier nur für Oberschwingungen der Ordnung 3 und 5 angegeben, da diese die größte Rolle spielen (siehe **Abb. N47**).

Oberschwingung der Ordnung	Eingangswirkleistung > 25 W	Eingangswirkleistung ≤ 25 W es gilt einer der 2 Grenzwerte:	
		% des Grund- schwingungsstroms	Oberschwingungsstrom bezogen auf
	% des Grund- schwingungsstroms	% des Grund- schwingungsstroms	

			Wirkleistung
3	30	86	3,4 mA/W
5	10	61	1,9 mA/W

Abb. N47: Maximal zulässiger Oberschwingungsstrom

Ableitströme

Elektronische Vorschaltgeräte enthalten im Allgemeinen Kondensatoren zwischen den netzseitigen aktiven Leitern und Schutzleiter/Erde. Diese Entstörkondensatoren verursachen ein kontinuierliches Fließen eines Ableitstromes von ca. 0,5 bis 1mA pro Vorschaltgerät. Dies führt zu einer begrenzten Vorschaltgeräteanzahl, die an eine Fehlerstromschutzeinrichtung (RCD) angeschlossen werden kann.

Beim Einschalten kann die Anfangslast dieser Kondensatoren ebenso das Fließen eines Stroms verursachen, dessen Stromspitze einen Wert von einigen A für eine Dauer von 10 µs erreichen kann. Diese Stromspitze kann zu unerwünschten Auslösungen nicht geeigneter Schutzeinrichtungen führen.

Hochfrequente Störemissionen

Elektronische Vorschaltgeräte verursachen hochfrequente, leitungsgeführte und gestrahlte Störemissionen.

Der sehr steile Anstieg an den Ausgangsleitern des Vorschaltgerätes führt zu Stromimpulsen in den Streukapazitäten zu Erde. Folglich fließen Streuströme im Schutzleiter und in den aktiven Leitern. Aufgrund der hohen Frequenz dieser Ströme ist ebenso eine elektromagnetische Strahlung vorhanden. Um diese hochfrequenten Störemissionen zu begrenzen, muss die Lampe in direkter Nähe zum Vorschaltgerät platziert werden, um somit die Länge der am stärksten strahlenden Leiter zu reduzieren.

Die verschiedenen Versorgungsarten

(siehe Abb. N48)

Technik	Versorgungsarten	Andere Schalter
Standard-Glühlampe	Direkte Stromversorgung	Dimmerschalter
Halogen-Glühlampe		
Niedervolt-Halogen-Glühlampe	Transformator	Elektronisch getaktetes Netzteil
Röhrenförmige Leuchtstofflampe	Magnetisches verlustarmes Vorschaltgerät und Starter	Elektronisches Vorschaltgerät Elektronischer Dimmer + Vorschaltgerät
Kompakt-Leuchtstofflampe	Integriert. elektr. Vorschaltgerät	
Quecksilberdampf	Magnetisches verlustarmes Vorschaltgerät	Elektronisches Vorschaltgerät
Hochdruck-Natriumdampf Lampe		
Niederdruck-Natriumdampf Lampe		
Halogen-Metall dampf Lampe		

Abb. N48: Verschiedene Versorgungsarten

Quelle: Planungskompodium Energieverteilung Wiki

Stand: April 2016