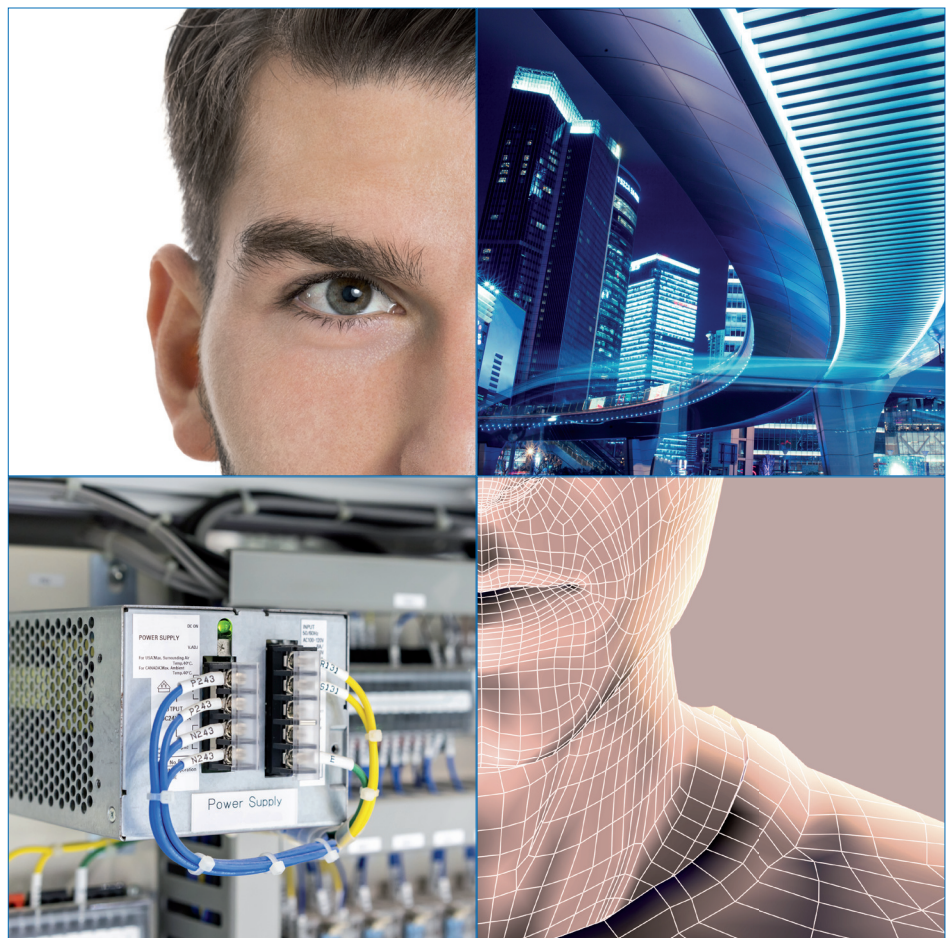


Information

DC-Lighting





DC-Lighting

Herausgeber:

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e. V.

Fachverband Licht

Lyoner Straße 9

60528 Frankfurt

Ansprechpartner: Wolfram Pajek

Telefon: +49 69 6302-349

E-Mail: pajek@zvei.org

www.zvei.org

Juli 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist
urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des
Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des
Herausgebers unzulässig.

Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzung,
Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und
Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Inhalt

1	Einleitung	4
2	DC-Topologien	4
3	Beispiele von DC-Beleuchtungsanlagen	5
4	Geräteschutzsicherungen und Leitungsschutzschalter für DC-Anwendung	10
5	Bekannte DC-Einsatzgebiete	15
6	Notbeleuchtung/Zentralbatterieanlagen	15
7	EMV-Anforderungen	17
8	Ausführungsformen von DC-Betriebsgeräten	18
9	Schalter und Aktoren	20
10	Fazit	22

1 Einleitung

2018 wurde durch DKE/VDE die deutsche Normungsroadmap „Gleichstrom im Niederspannungsbe-
reich“, Version 2 veröffentlicht. Das Werk behandelt umfassend wirtschaftliche und rechtliche Rah-
menbedingungen, Normen, Schutzziele und Schutzkonzepte für Anlagen und Komponenten und führt
bei Anwendungsbeispielen auch Beleuchtungssysteme auf.

Diese Schrift baut auf dem bestehenden Werk auf und zeigt darüber hinaus interessante und wichtige
Aspekte für den Betrieb von gleichspannungsversorgten Beleuchtungsanlagen.

Seit längerem wird in Fachkreisen diskutiert, anstelle von reinen AC-Netzen auch DC-Versorgungs-
netze zu realisieren, um Energieeinsparungen zu erreichen.

Ein Diskussionspunkt ist die PV-Technik, bei der die Energie der Sonnenkollektoren bereits in Form
von Gleichspannung vorliegt und es naheliegend erscheint, ohne den Einsatz von Wechselspannung
die Energie direkt in Batterien zu speichern und bei Bedarf zu nutzen. Da Batterien bereits Gleich-
stromenergie speichern, erscheint es sinnvoll, diese ohne Umwege über Wechselspannungserzeuger
in ein DC-Verteilungsnetz einzuspeisen und angeschlossene Verbraucher direkt mit Gleichspannung
zu versorgen.

Die PoE-Technik (Power over Ethernet) nutzt ebenfalls Gleichspannung zur Versorgung der an den
Ethernet-Netzwerkswitch angeschlossenen Leuchten.

Mögliche Energieeinsparung fällt dabei im Wesentlichen durch den Wegfall von Konvertierungsver-
lusten aus der AC/DC-Wandlung in Netzteilen bzw. DC/AC-Wandlung in Wechselrichtern an. Bei elekt-
ronischen Vorschaltgeräten für DC-Anwendungen besteht darüber hinaus die Möglichkeit, Einsparun-
gen durch vereinfachte, DC-gerechte Schaltungskonzepte zu erreichen.

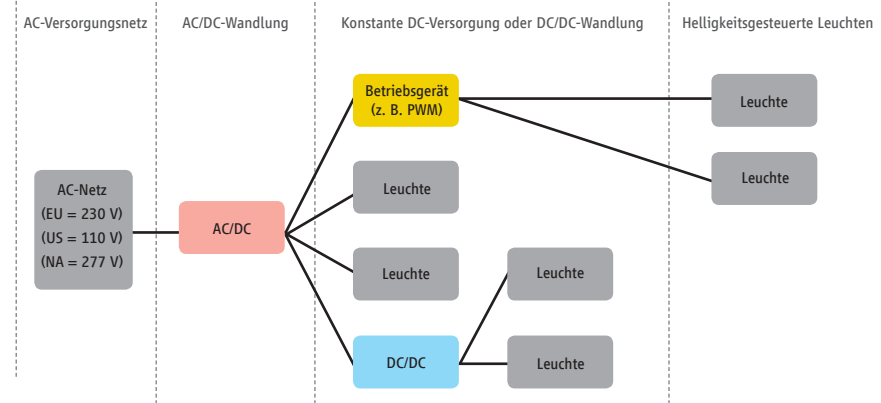
Erste Beleuchtungsanlagen mithilfe der PoE-Technik sowie Rechenzentren mit DC-Versorgung sind
bereits realisiert.

2 DC-Topologien

Das Bild 1 zeigt die schematische Anordnung einer möglichen AC/DC-Topologie. Ausgehend von der
Netzspannungsversorgung AC, erfolgt eine AC/DC-Wandlung. Je nach Leistungsbedarf der Anwen-
dung wandelt diese Stufe in eine entsprechende Gleichspannung um. Gängige Spannungsniveaus
sind in Kapitel 5 aufgeführt. Je nach Bedarf können weitere DC/DC-Wandler zur Spannungsredu-
zierung verwendet werden. Leuchten und Beleuchtungsstromkreise werden mit den jeweiligen DC-
Ausgangsspannungen betrieben.

Der Einsatz von zusätzlichen Betriebsgeräten ermöglicht eine zentrale Helligkeitssteuerung.

Bild 1: Beispiel einer DC-Topologie



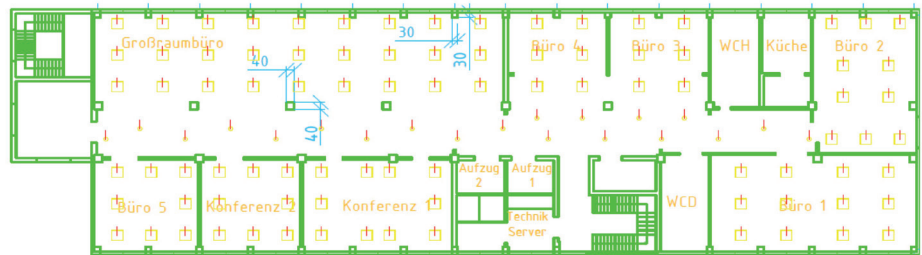
3 Beispiele von DC-Beleuchtungsanlagen

In diesem Kapitel wird anhand von drei unterschiedlichen Beleuchtungsanlagen die Nutzung von Gleichspannung dargestellt.

a) Bürobeleuchtung

Eine typische Beleuchtungsanlage eines Bürogebäudes ist in Bild 2 dargestellt.

Bild 2: Darstellung eines Bürogebäudes



Den für den Betrieb der Beleuchtungsanlage erforderlichen Leistungsbedarf zeigt Tabelle 1.

Tab. 1: Leistungsbedarf

Teilbereich	Leistungsbedarf	Grundfläche	Gesamtleistung
Großraumbüro + Büros 3 + 4	8,83 W/m ²	279,71 m ²	2470 W
Büro 1	10,0 W/m ²	60,02 m ²	600 W
Büro 2	11,42 W/m ²	43,78 m ²	500 W
Büro 5	13,87 W/m ²	28,85 m ²	400 W
Konferenzraum 1	11,96 W/m ²	41,80 m ²	500 W
Konferenzraum 2	14,38 W/m ²	27,82 m ²	400 W
Durchschnitt/Summe	10,1 W/m²	482 m²	4,87 kW

Beim Aufbau eines Leitungsnetzes spielt die Belastbarkeit der Leitungen eine wichtige Rolle. Die Höhe der transportierbaren Energie richtet sich nach der elektrischen Spannung und nach dem Strom. In erster Näherung ergeben sich nach Tabelle 2 folgende maximale Verhältnisse:

Tab. 2: Maximal übertragbare Leistung abhängig von der Spannungshöhe bei einem Leitungsquerschnitt 1,5 mm²

Spannung U	48 V DC	120 V DC	230 V DC	380 V DC
Max. Strom I	10 A	10 A	10 A	10 A
Max. Leistung P	480 W	1.200 W	2.300 W	3.800 W

Bei Spannungen <230 V ergibt sich zwangsläufig ein erhöhter Installationsaufwand aufgrund größerer Leitungsquerschnitte im Vergleich zur heutigen 230-V-AC-Technik. Die Bilder 3 und 4 zeigen einen Vergleich der Leitungsquerschnitte, bezogen auf den Einsatz unterschiedlicher Spannungsebenen.

Bild 3: 230V DC-System

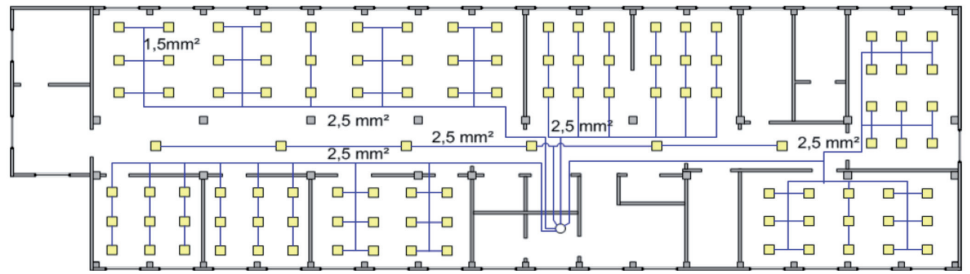
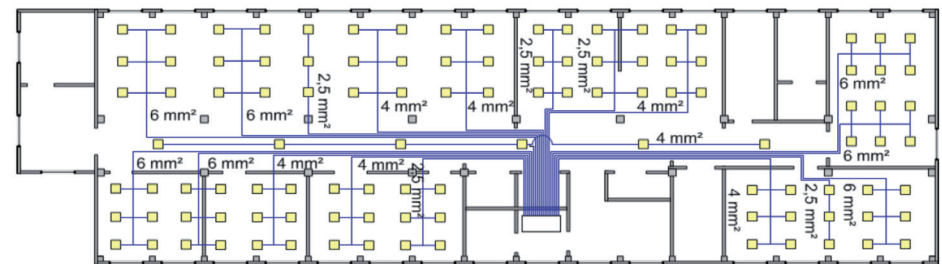


Bild 4: 48V DC-System

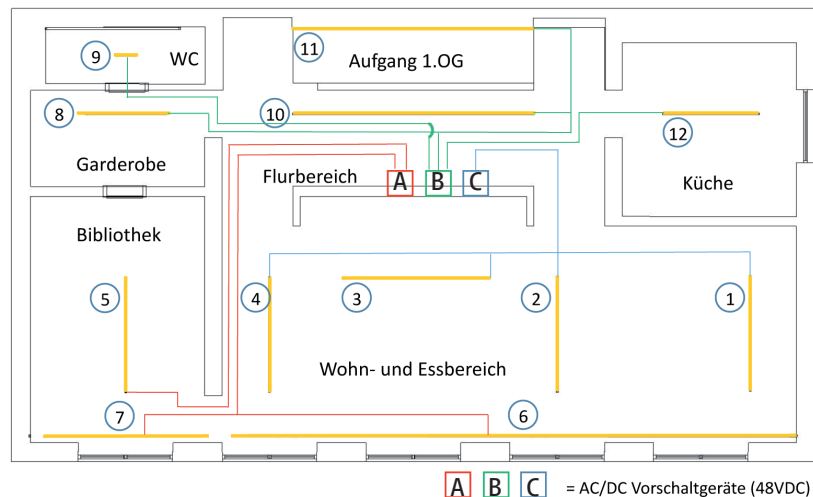


Bei kleineren Beleuchtungsanlagen wie zum Beispiel in Wohnhäusern und in der Shopbeleuchtung kann auch mit kleinen Spannungen gearbeitet werden. Dabei muss der Leiterquerschnitt sinnvoll gewählt werden, um die Leistungsverluste zu begrenzen.

b) Einfamilienwohnhaus, eine Etage

Das Beispiel behandelt die Beleuchtungsanlage eines Einfamilienhauses (Erdgeschoss) auf Basis eines 48-V-DC-Spannungsniveaus. Die Etage wird über 3 x 320-W-AC/DC-Vorschaltgeräte (A, B, C) mit mehreren Ausgängen 48 V DC gespeist, wobei ein Kabelquerschnitt 1,5 mm² verwendet wird. Die Anzahl der benötigten Betriebsgeräte ist im Gegensatz zur AC/DC-Anwendung deutlich reduziert. Durch den Einsatz von drei statt zwölf Betriebsgeräten in der Etage reduzieren sich die Leistungsverluste und die Anzahl an ungewollten Netzurückkopplungen im Gegensatz zur altbekannten AC/DC-Anwendung. Eine Ansteuerung der Leuchten erfolgt entweder direkt über die Betriebsgeräte mit integrierter Steuerschnittstelle oder über zusätzliche Steuereinheiten von Drittherstellern. Die Helligkeitssteuerung von Leuchten erfolgt mittels Pulsweitenmodulation (PWM).

Bild 5: DC-Beleuchtung eines Einfamilienhauses



Der Spannungsfall über die Zuleitung spielt bei Gleichstromanwendungen mit geringem Spannungsniveau eine wichtige Rolle. In der gesamten Etage wird ein Spannungsfall von maximal drei Prozent eingehalten. Tabelle 3 zeigt die jeweilige Leuchtenkonfiguration, bezogen auf die Leuchtennummer (aus Bild 5).

Tab. 3: Leuchtenkonfiguration Einfamilienhaus

Leuchte 48 V DC	Art (Optik)	Leistung [W]	Länge der Zuleitung [m]	Spannungsfall (%)
1	Anbauleuchte (65°)	60,00	8	0,48
2	Anbauleuchte (65°)	60,00	4	0,25
3	Anbauleuchte (65°)	75,00	5	0,39
4	Anbauleuchte (65°)	60,00	12	0,75
5	Anbauleuchte (65°)	60,00	11	0,69
6	Voutenleuchte (Opal)	120,00	17	1,48
7	Voutenleuchte (Opal)	40,00	11	0,45
8	Anbauleuchte (Opal)	68,00	7	0,50
9	Anbauleuchte (Opal)	10,00	8	0,08
10	Anbauleuchte (Opal)	75,00	4	0,31
11	Voutenleuchte (Opal)	50,00	7	0,35
12	Anbauleuchte (65°)	80,00	7	0,58

Den für den Betrieb der Beleuchtungsanlage erforderlichen Leistungsbedarf je Teilbereich zeigt Tabelle 4.

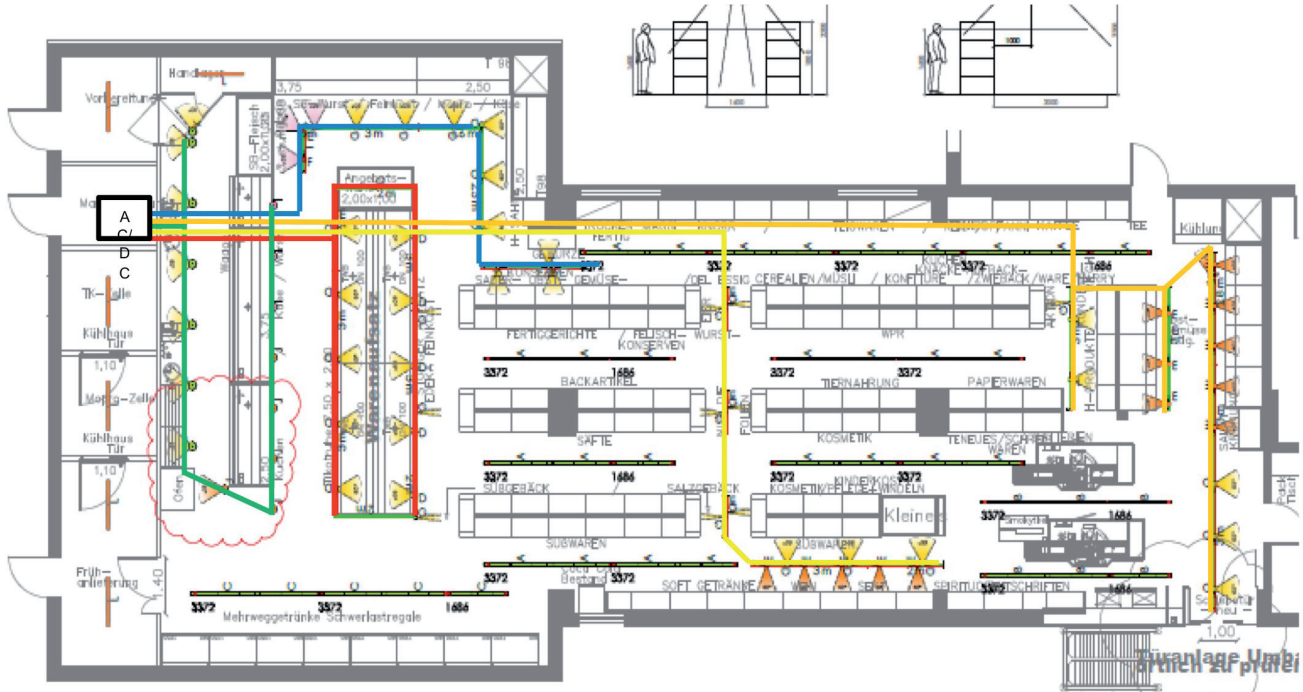
Tab. 4: Leistungsbedarf Beleuchtungsanlage

Teilbereich	Fläche [m ²]	Lux [lx]	Leistung [W]	Leistungs- bedarf [W/m ²]	W/ (m ² *100lx)
Wohn-/Essbereich	54	350	375	6,9	1,97
Bibliothek	18	500	100	5,55	1,11
Garderobe	7	350	68	9,7	2,77
WC	4	150	10	2,5	1,66
Aufgang 1.OG	6	150	50	8,3	5,55
Flurbereich	16	350	75	4,6	1,33
Küche	13	750	80	6,2	0,82
Gesamt	118		758	6,4 (Durchschnitt)	2,17 (Durchschnitt)

c) Beispiel Shopbeleuchtung

Das Bild 6 zeigt die beispielhafte Anordnung einer Shopbeleuchtungsanlage.

Bild 6: Beispiel für Shop-Beleuchtung mit Spannungsversorgung DC 48V und DC 380 V



Die Leiterquerschnitte der Niederspannungsschienen liegen zwischen 3,4 und 4 mm². Eine entsprechende Zuleitung kann mit 4 mm² Leiterquerschnitt gewählt werden. Die Leuchten sind in verschiedene Stromkreise eingeteilt, ähnlich wie bei der AC-Technologie. Bei ca. 480 W Leistung pro Stromkreis können bei durchschnittlich 30 W Leuchtenleistung ca. 16 Leuchten an einen Stromkreis angeschlossen werden.

In dem Beispiel wird eine zentrale 48-V-Versorgung (A) gewählt, um den ungünstigsten Fall in Bezug auf die Leitungslängen darzustellen. Bei einer dezentralen Konversion von zum Beispiel 380 V auf 48 V können die Leitungsverluste deutlich minimiert werden. Bei der Berechnung der Leitungsverluste wird ein Leiterquerschnitt 4 mm² zugrunde gelegt. Die Berechnung verwendet dazu einen Widerstand von 8,55+10⁻³ Ohm/m. Es wurde die Hin- und Rückleitung berücksichtigt, sodass die einfache Strecke als Leitungslänge angegeben ist. Die Berechnung wurde vereinfacht, indem der Verbraucher ans Ende der Leitung gelegt wurde. Damit ergibt sich der ungünstigste Fall für die Berechnung. Die Tabelle 5 zeigt eine Übersicht der Leitungslängen, Anschlussleistungen, Anschlussströme und Leitungsverluste.

Tab. 5: Übersicht Leitungslänge, Anschlussleistung und -strom, Verluste

Stromkreis	Leitungslänge	Anschlussleistung	Anschlussstrom	Leitungsverlust
1	46 m	410 W	8,5 A	29 W
2	30 m	322 W	6,7 A	12 W
3	19 m	330 W	6,9 A	7,6 W
4	23 m	322 W	6,7 A	8,8 W
5	18 m	389 W	8,1 A	10 W
Gesamt		1773 W		67,4 W

Die Leitungsverluste betragen 3,8 Prozent der Anschlussleistung. Bei einem Vergleich mit einer 230-V-Lösung würden die Leitungsverluste bei 8,2 W bei gleicher Aufteilung der Stromkreise liegen. Zusätzlich kommen ca. 3 bis 5 Prozent Verlustanteile für die PFC-Schaltkreise und die SELV-Übertrager hinzu.

Die Langfeldleuchten im Beispiel werden als geschlossene Systeme mit 380 V DC betrieben. Die Anschlussleistung beträgt ca. 1.900 W, was einem Anschlussstrom von 5 A entspricht. Sinnvollerweise wird auf zwei Stromkreise aufgeteilt.

Der dargestellte Shop umfasst eine Fläche von ca. 500 m² mit einem durchschnittlichen Leistungsbedarf der Beleuchtungsanlage von 7,3 W/m².

Typische Ladenflächen liegen zwischen 500 und 5.000 m² und haben einen Leistungsbedarf von ca. 7 bis 11 W/m².

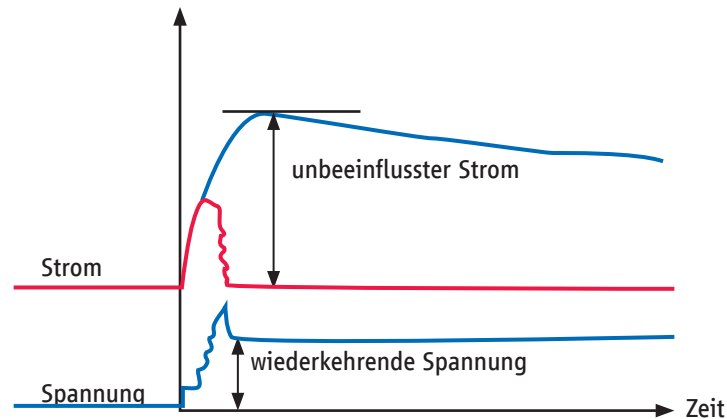
Leitungsquerschnitte

Bezüglich der Leitungsquerschnitte wird davon ausgegangen, dass ca. 80 Prozent des Leitungsquerschnitts ausreichend sind, um die gleiche DC-Leistung wie in einem AC-System zu übertragen. Bis auf Weiteres plant man aber mit den bekannten Querschnitten 1,5 mm², 2,5 mm², 4,0 mm² etc., da die Alterungsprozesse in DC-Systemen nicht bekannt sind und bei einem Querschnitt von zum Beispiel nur 1 mm² Aderbrüche eher zu erwarten sind. Daher wird auch seitens DKE und IEC ein Wert von 1,5 mm² als kleinster Querschnitt für die feste Verdrahtung angenommen.

4 Geräteschutzsicherungen und Leitungsschutzschalter für DC-Anwendung

Im Folgenden werden der Unterschied, die Funktionsweise und Auslösecharakteristiken von Geräteschutzsicherungen und Leitungsschutzschaltern im AC- und DC-Betrieb dargestellt. Das Abschaltverhalten im Falle eines Kurzschlusses bei Gleichstrom ist grundsätzlich vergleichbar zur Abschaltung bei Wechselstrom (Bild 7). In der Sicherung baut sich eine hohe Lichtbogenspannung auf, die beim Überschreiten der wiederkehrenden Spannung den Strom zu Null zwingt. Der Stromanstieg wird jedoch anstatt vom Einschaltzeitpunkt und Leistungsfaktor von Zeitkonstanten bestimmt.

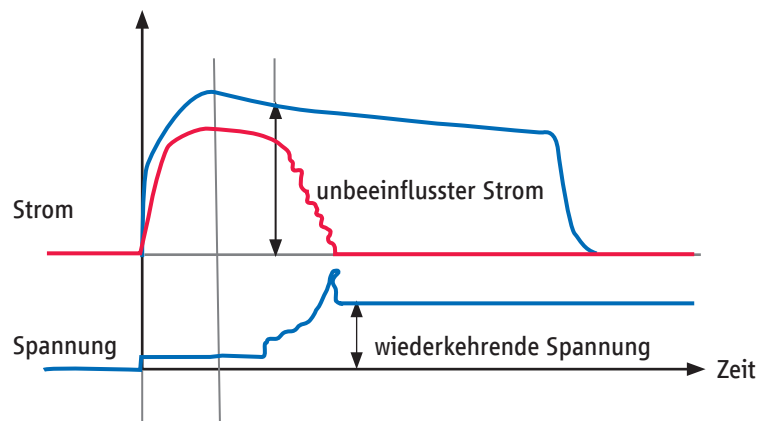
Bild 7: DC-Kurzschlussabschaltung



Überlastabschaltungen durch Gleichstromsicherungen verlaufen anders als Überlastabschaltungen bei Wechselstromsicherungen (Bild 8).

Bei Gleichstrom gibt es keinen periodischen Nulldurchgang und damit auch keinen Moment ohne magnetische Energie im Stromkreis mit günstigen Lösbedingungen für den Lichtbogen. Der Lichtbogen erlischt erst, wenn die Lichtbogenspannung die Gleichspannung überschreitet und einen Stromnulldurchgang erzwingt. Die im Stromkreis gespeicherte magnetische Energie wird bei Gleichstromabschaltungen im Lichtbogen absorbiert.

Bild 8: DC-Überlastabschaltung



Die thermische Beanspruchung der Sicherung ist daher bei diesem Schaltvorgang unvergleichlich höher als bei Wechselstrom.

Bedingt durch die unterschiedlichen Überlastabschaltungen bei DC im Vergleich zu AC bestehen entweder konstruktive Unterschiede im Aufbau der Sicherungen oder Sicherungen verfügen über reduzierte Schaltvermögen bei DC im Vergleich zu AC. Details zur Anwendung der Sicherungen sind den Datenblättern zu entnehmen. Bei der Auslegung einer DC-Beleuchtungsanlage muss sichergestellt werden, dass die zum Auslösen von Sicherungen erforderlichen Auslöseströme von der jeweils speisenden Quelle geliefert werden können.

Normen für Sicherungen

Auch in Gleichstromnetzen werden Sicherungen zum Schutz vor Überströmen und Kurzschlüssen benötigt. Die nachfolgenden Tabellen 6, 7 und 8 zeigen die zurzeit gültigen Normen. Es ist zu beachten, dass nicht alle Normen bereits Anforderungen für den Einsatz in Gleichstromnetzen beinhalten.


Tab. 6: Geräteschutzsicherungen nach IEC 60127 (G-Sicherungen)

Teil	Beschreibung/Inhalt
IEC 60127-1	Begriffe für G-Sicherungen und allgemeine Anforderungen an G-Sicherungseinsätze Generelle Definition von Begriffen / Definitionen und Prüfungen zu den Geräteschutzsicherungen
IEC 60127-2 	Geräteschutzsicherungseinsätze Besondere Anforderungen an G-Sicherungseinsätze mit den Maßen 5 x 20 mm und 6,3 x 32 mm Definition von ergänzenden Prüfungen, einzuhaltende Parameter wie: Strom-Zeit-Kennlinie, Ausschaltvermögen, Spannungsfall und Verlustleistung U_N : 250 V AC I_N : 32 mA bis 10 A Ausschaltvermögen: 35 A bis 1.500 A
IEC 60127-3 	Kleinstsicherungen Kleinstsicherungseinsätze rund und eckig für gedruckte Schaltungen U_N : bis 250 V (AC, DC) I_N : 2 mA bis 10 A Ausschaltvermögen: 35 A bis 100 A
IEC 60127-4 	Universelle modulare Sicherungseinsätze (UMF) Welteinheitliche modulare Sicherungseinsätze (UMF) für gedruckte Schaltungen und andere Trägermaterialien (THT & SMD) U_N : 12,5 V bis 250 V (AC, DC) I_N : 32 mA bis 10 A Ausschaltvermögen: 35 A bis 1.500 A
IEC 60127-5	Leitfaden für die Qualitätsbewertung von G-Sicherungen
IEC 60127-6 	Sicherungsschalter für G-Sicherungen Definition von Prüfungen und einzuhaltenden Parametern von Sicherungshaltern für Sicherungseinsätze nach IEC 60127-2 und IEC 60127-3 offene und geschlossene Bauformen
IEC 60127-7	Sicherungseinsätze für Sonderanwendungen U_N : bis 1.000 V I_N : bis 20 A Ausschaltvermögen: bis 50 kA
IEC 60127-8	Sicherungswiderstände mit Überstromschutz Aktuell wird an einem Entwurf auf IEC-Ebene gearbeitet
IEC 60127-9	Frei für weitere Dokumente
IEC 60127-10	Handbuch für G-Sicherungen Begriffe und Definitionen zu G-Sicherungen

Tab. 7: Niederspannungssicherungen nach IEC 60269

Teil	Beschreibung/Inhalt
IEC 60269-1	Niederspannungssicherungen – Allgemeine Anforderungen Generelle Definition von Begriffen / Definitionen und Prüfungen zu den Niederspannungssicherungen Schmelzsicherungen mit Ausschaltvermögen ab 6kA und Nennspannungen bis 1000V AC / 1500V DC
IEC 60269-2 	Niederspannungssicherungen – Zusätzliche Anforderungen an Sicherungen zum Gebrauch durch Elektrofachkräfte bzw. elektrotechnisch unterwiesene Personen (Sicherungen überwiegend für den industriellen Gebrauch) <ul style="list-style-type: none"> • U_N: bis 690V AC / 440V DC • I_N: bis 1.250 A • Ausschaltvermögen: mind. 50kA AC / 25kA DC
IEC 60269-3 	Niederspannungssicherungen – Zusätzliche Anforderungen an Sicherungen zum Gebrauch durch Laien (Sicherungen überwiegend für Haushaltsinstallationen und ähnliche Anwendungen, dürfen auch von Laien gewechselt werden) <ul style="list-style-type: none"> • U_N: bis 500V AC&DC • I_N: bis 100A • Ausschaltvermögen: mind. 50kA AC / 8kA DC
IEC 60269-4 	Niederspannungssicherungen – Zusätzliche Anforderungen an Sicherungseinsätze zum Schutz von Halbleiter-Bauelementen Sicherungseinsätze zum Gebrauch in Geräten mit Halbleiter-Bauelementen (sehr flink, da Halbleiter sehr empfindlich gegen Überströme sind) <ul style="list-style-type: none"> • Ausschaltvermögen: mind. 50kA AC / 8kA DC empfohlen
IEC 60269-5	Niederspannungssicherungen – Leitfaden für die Anwendung von Niederspannungssicherungen Anwendungsrichtlinie für Niederspannungssicherungen
IEC 60269-6 	Niederspannungssicherungen – Zusätzliche Anforderungen an Sicherungseinsätze für den Schutz von solaren photovoltaischen Energieerzeugungssystemen Sicherungseinsätze für den Schutz von PV-Strängen und PV-Feldern (PV-Arrays) in Betriebsmitteln <ul style="list-style-type: none"> • Charakteristik gPV • U_N: bis 1500V DC • Ausschaltvermögen: mind. 10kA DC
IEC 60269-7	Niederspannungssicherungen – Sicherungseinsätze für den Schutz von Batterien Aktuell wird an einem Entwurf auf IEC-Ebene gearbeitet

Tab. 8: Übersicht weiterer Normen für Sicherungen

Teil	Beschreibung/Inhalt
ISO 8820 	Sicherungseinsätze für Straßenfahrzeuge
IEC 60282	Hochspannungssicherungen Für Spannungen höher 1.000 V Wechselstrom
IEC 60549	Hochspannungssicherungen für externen Schutz von Parallelkondensatoren
IEC 60644	Hochspannungs-Sicherungseinsätze für Motorstromkreise

Fehlermöglichkeiten bei Geräteschutzsicherungen nach IEC 60127 in Gleichstromanwendungen

Ein ordnungsgemäßer Betrieb der Geräteschutzsicherung ist bei Einhaltung der Betriebsparameter Bemessungsspannung und Abschaltstrom gewährleistet. Die Überschreitung der zulässigen DC-Bemessungsspannung der Sicherung kann schwerwiegende Folgen haben. Da der Nulldurchgang in DC-Anwendungen fehlt, kann bei Überschreiten der zulässigen DC-Bemessungsspannung der Lichtbogen „stehenbleiben“ mit der Folge extrem hoher Temperaturen sowie dem Austritt von metallisiertem Material, das erneut Kurzschlüsse verursachen kann. Durch die Wärme und Druckentwicklung kann die Sicherung soweit beschädigt werden, dass der Lichtbogen nach außen tritt. In Kombination mit brennbaren Materialien in der Nähe der Sicherung ist die Gefahr für einen Brand sehr hoch. Eine Explosion der Sicherung stellt, neben dem Austritt des Lichtbogens durch die umherfliegenden Teile, auch eine Gefahr dar.

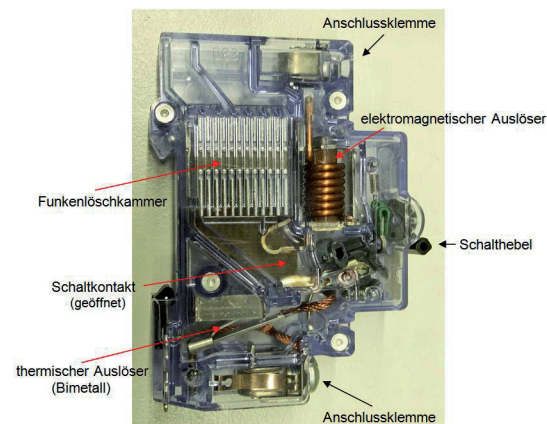
Bei Sicherungen ohne Löschmittel passt in den meisten Fällen die Näherung DC-Spannung gleich halber AC-Wert. Bei kleinen Spannungen bis 65 V DC gibt es eine große Auswahl an Sicherungen, hier bilden sich Lichtbögen mit nur geringer Energie. Ab 100 V werden Sicherungen mit Keramikkörper und entsprechendem Löschmittel verwendet.

Superflinke Sicherungen sind für hohe Gleichspannungen geeignet, da sie nur dem reinen Kurzschlusschutz dienen, träge Sicherungen gleicher Bauform kommen an diese Werte (Gleichspannungen) nicht heran. Hier spielt die Zeitkonstante des Kurzschlusskreises eine große Rolle, je größer die Zeitkonstante, desto niedriger der Wert der zulässigen Gleichspannung.

Leitungsschutzschalter

Das Bild 9 zeigt den konstruktiven Aufbau eines Leitungsschutzschalters.

Bild 9: Aufbau Leitungsschutzschalter



Funktion des Leitungsschutzschalters

Thermische Auslösekennlinie (a):

Kleiner Prüfstrom I_1 = festgelegter Nichtauslösestrom des Sicherungsautomaten, je nach Typ

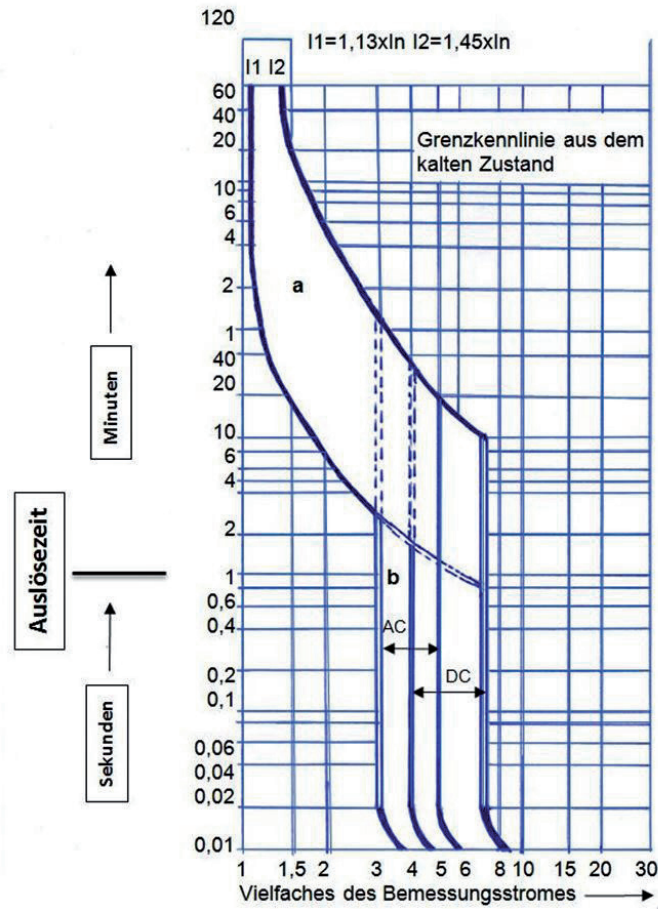
Großer Prüfstrom I_2 = festgelegter Auslösestrom des Sicherungsautomaten, je nach Typ

Elektromagnetische Auslösekennlinie AC (b):

Der Sicherungsautomat hält Stromstöße mit einem Vielfachen des Bemessungsstromes aus. Die genauen Vielfachen und Zeiten sind den Herstellerangaben zu entnehmen.

Die thermische Auslösekennlinie ist bei AC und DC immer gleich, der magnetische Schwellenwert bei DC ist höher als bei AC, die Bemessungsspannung ist niedriger.

Bild 10: Auslösekennlinie Leitungsschutzschalter



Die meisten Leitungsschutzschalter können auch in Gleichstromnetzen verwendet werden. Je nach Hersteller sind Bemessungsspannungen 1-polig bis 72 V und 2-polig bis 125 V DC angegeben.

Darüber hinaus stehen spezielle Allstrom-Leitungsschutzschalter (UC), die sowohl für Gleich- als auch für Wechselstrom verwendet werden können, von verschiedenen Herstellern zur Verfügung.

5 Bekannte DC-Einsatzgebiete

Die Tabelle 9 zeigt eine Übersicht über die Anwendung verschiedener Gleichspannungen

Tab. 9: Übersicht DC-Spannungen

Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ)	400–800 kV
Fahrzeug Bordspannungsversorgung	Bis 48 V
E-Mobilität	Batteriespannung bis etwa 800 V
Bahnanwendung (nicht DB)	750 V (500–1.200 V) Ausnahmen bis 1,5 kV / 3 kV, (historisch bedingt)
LVD	75–1.500 V
Photovoltaik	Bis etwa 1.500 V Strangspannung
Rechenzentren	Bis zu 400 V
Notstromversorgung	216 V typisch (18x12V)
SELV	Max. 120V
Telefon	60V
PoE	50 V, bis 100 W
USB	5 V (bis 24 V)
Mikroprozessoren	< 5 V

6 Notbeleuchtung/Zentralbatterieanlagen

DIN EN 50171 legt die allgemeinen Anforderungen an zentrale Stromversorgungssysteme für eine unabhängige Energieversorgung von notwendigen Sicherheitseinrichtungen fest. Die zentralen Stromversorgungen sind dafür vorgesehen, bei Ausfall der allgemeinen Stromversorgung die Sicherheitsbeleuchtung für Rettungswege zu speisen. In der Ausgabe 11/2001 wurden die bis dahin geltenden Bezeichnungen Zentralbatterieanlage und Gruppenbatterieanlage durch zentrale Stromversorgungssysteme ohne Leistungsbegrenzung (CPS-System, Central Power Supply System) und zentrale Stromversorgungssysteme mit Leistungsbegrenzung (LPS-System, Low Power Supply System) ersetzt.

Das CPS ist ein zentrales Stromversorgungssystem, das ohne jede Begrenzung der Ausgangsleistung den geforderten Notstrom für die notwendigen Sicherheitseinrichtungen liefert. Bei einem CPS-System werden in der Regel 18 Batterieblöcke mit einer Spannung von 12 V in Reihe geschaltet. Die Batteriespannung liegt dementsprechend im Mittel bei 216 V. Diese Spannung ist aber abhängig vom Ladezustand und der Umgebungstemperatur der Batterie. Im Notbetrieb wird auf die Batteriespannung umgeschaltet und die angeschlossenen Leuchten darüber direkt versorgt.

Das LPS ist dagegen ein zentrales Stromversorgungssystem mit Begrenzung der Ausgangsleistung auf 500 W für eine Dauer von 3 h oder 1.500 W für eine Dauer von 1 h. Die Anzahl der Batterien, die miteinander verschaltet werden, kann bei diesen Systemen recht unterschiedlich sein. Eine gängige Topologie ist die Reihenschaltung von zwei 12-V-Batterieblöcken. Auch hier kann die 24-V-Systemspannung entsprechend dem Ladezustand der Batterie und der Umgebungstemperatur unterschiedlich hoch sein. Im Notbetrieb werden die angeschlossenen Leuchten entweder direkt aus der Batterie gespeist oder die Spannung wird über einen Wechselrichter oder Wandler auf 230 V AC oder DC transformiert. Da die Notbeleuchtung heutzutage größtenteils in LED-Technik ausgeführt wird und die angeschlossenen Leuchten nur eine geringe Leistung haben, hat es sich als vorteilhaft herausgestellt, die Leuchten an einem 24-V-Versorgungsnetz zu betreiben. Die Verluste durch die Spannungsumwandlung entfallen. Im Normalbetrieb werden die Leuchten über ein AC/DC-Wandler versorgt. An den Stromkreisen liegt nur Schutzkleinspannung an.

Zentrales Stromversorgungssystem mit Leistungsbegrenzung (LPS) und Schutzkleinspannung auf den Ausgangstromkreisen.

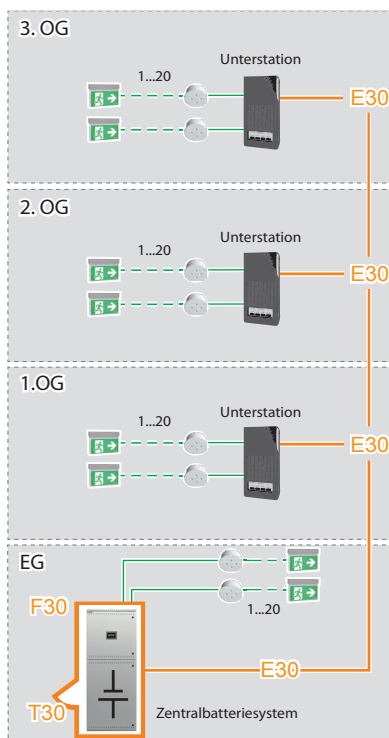
- Vermeidung kostenintensiver Installation von Funktionserhalt durch Versorgung nur eines Brandabschnitts
- Systeme mit Schutzkleinspannung besonders geeignet für Nassbereiche
- Vereinfachte Unterbringung
- Höheres Sicherheitsniveau durch Versorgung nur eines Brandabschnitts
- Einsatz von kleineren effektiven Betriebsgeräten
- Einfachere Leuchtenkonstruktion
- Weniger Gefährdungspotenzial während der Installation und Wartung
- Schalt- und Sicherungselemente sind nur für Schutzkleinspannung auszuwählen
- Bei größeren Leistungen entsprechende Leitungsquerschnitte notwendig
- Größere Anzahl von Anlagen pro Gebäude

Zentrale Stromversorgungssysteme ohne Leistungsbegrenzung (CPS)

- Flexible Anzahl an Stromkreisen je Gerät, erweiterbar durch Unterstationen
- Stromkreise mit verschiedenen Leistungen
- Leuchten der Allgemeinbeleuchtung können mitversorgt werden
- Inbetriebnahme und Wartung muss nur an einem Gerät vorgenommen werden
- Schalt- und Sicherungselemente müssen für eine DC-Spannung bis zu 260 V ausgelegt sein
- Funktionssicherheit und Verfügbarkeit des Gesamtsystems meist abhängig von nur einer Batterie
- Hohe Kosten für Funktionserhalt (eigener Raum, E-30-Installation)

Bild 11: Anlagenaufbau CPS/LPS

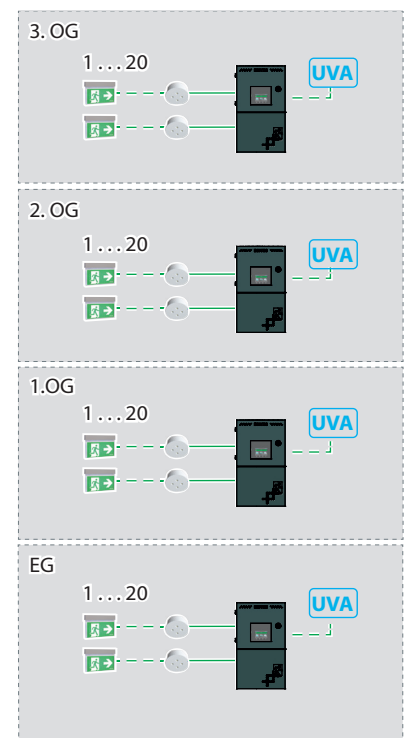
zentraler Anlagenaufbau mit CPS*¹



*¹ Brandabschnitt max. 1.600 m²

- Bei Ausfall der CPS Ausfall der kompletten Sicherheitsbeleuchtung.
- Bei Störung in der Verkabelung zwischen CPS und den Unterstationen Ausfall aller nachgeschalteten Unterstationen und damit der Sicherheitsbeleuchtung.
- Durch autarke LPS-Systeme Ausfall der Sicherheitsbeleuchtung nur im betroffenen Bereich.
- Kein Funktionserhalt erforderlich.

dezentraler Anlagenaufbau mit LPS*¹



7 EMV-Anforderungen

Mit gleichstromversorgten Leuchten wird nach aktueller EMV-Normenlage wie folgt verfahren:

a) Störaussendung

Die Störaussendung einer Beleuchtungseinrichtung wird generell nach EN 55015 bewertet und bezieht sich auf einzelne Komponenten (Leuchten und unabhängige Betriebsgeräte). Bei Beleuchtungsanlagen wird deshalb nicht die gesamte Anlage bewertet. Eine mit DC versorgte Leuchte zum Anschluss an das Niederspannungsnetz bzw. für Batteriebetrieb wird ebenfalls nach EN 55015 bewertet. Die in der Niederspannungsrichtlinie festgelegten Spannungsgrenzen (50–1.000 V AC, 75–1.500 V DC) gelten nicht für die EMV.

Eine Überprüfung der Anforderungen nach EN 61000-3-2 für die Netzstromüberschwingungen ist bei DC-versorgten Prüflingen nicht möglich.

EN 61000-3-3 gilt weiterhin für Netzzrückwirkungen in die öffentliche Stromversorgung.

Zukünftig werden TLA-Anforderungen (Temporary Light Artefacts) auch an DC-Beleuchtungsanlagen gestellt, siehe dazu die TLA-Information des FV Licht. Die Auswirkungen von Spannungsschwankungen auf der AC-Ebene werden auf der DC-Sekundärseite durch die Beurteilung auftretender Helligkeitsschwankungen geprüft.

b) Störfestigkeit

Neben der Störaussendung muss auch die Störfestigkeit der DC-Leuchten (und -Versorgungseinheiten) betrachtet werden. In EN 61547 (Einrichtung für allgemeine Beleuchtungszwecke – EMV-Störfestigkeitsanforderungen) werden Anforderungen an DC-versorgte Beleuchtungseinrichtungen (Batteriebetrieb) angegeben.

Für einige Störfestigkeits-Prüfdisziplinen wie zum Beispiel Entladung statischer Elektrizität, hochfrequente elektromagnetische Felder, schnelle Transienten sowie eingespeiste Ströme bestehen in EN 61547 Anforderungen an DC-Netzeingänge.

Da aber nicht für alle Prüfdisziplinen (z. B. Stoßspannungen/-ströme oder Spannungseinbrüche und Kurzzeitunterbrechungen) Anforderungen an DC-versorgte Beleuchtungseinrichtungen in der EN 61547 definiert sind, diese aber in DC-Netzen auftreten können, wird auch auf die Fachgrundnorm EN 61000-6-1 (Störfestigkeit für Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleingewerbe) hingewiesen.

8 Ausführungsformen von DC-Betriebsgeräten

LEDs und viele am Markt verfügbare LED-Module benötigen zum Betrieb eine DC-Konstantstromquelle. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, den Betriebsstrom für LED/LED-Module konstant zu regeln.

a) Gleichspannungswandler (DC/DC-Wandler)

sind in vielfältigen Ausführungsformen verfügbar. Auswahlkriterien sind Eingangs- und Ausgangsspannungen und die zu übertragende Leistung. Buck-, Boost- und Buck-Boost-Wandler sind gängige Ausführungsformen.

Buck-Konverter (Bild 12) – Eingangsspannung > Ausgangsspannung (Abwärtswandler)

Boost-Konverter – Eingangsspannung < Ausgangsspannung (Aufwärtswandler)

Buck-Boost-Konverter – Eingangsspannung < oder > Ausgangsspannung (Inverswandler).

Die galvanische Trennung ist grundsätzlich ein Kriterium in Verbindung mit SELV-Anwendungen sowie ein Hilfsmittel zur Reduzierung von „Nachglimmen“. Es ist abzuwägen, die Trennung entweder in der AC/DC-Stufe oder in der DC/DC-Wandlerstufe vorzunehmen.

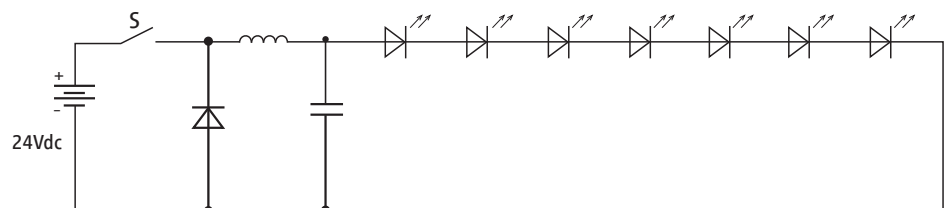
Ein typisches Beispiel für einen galvanisch getrennten DC-DC-Wandler ist der Fly-Back-Konverter (Sperrwandler) – die Eingangsspannung kann sowohl kleiner als auch größer als die Ausgangsspannung sein. Zusätzlich sorgt ein Transformator für eine galvanische Trennung zwischen Eingangskreis und Ausgangskreis. Schaltungstechnisch wird eine Rückwirkung des Ausgangskreises auf den Eingangskreis durch Einsatz einer Sperrdiode verhindert.

Helligkeitssteuerungen werden durch zusätzliche Elemente realisiert.

Tab. 10: Strombegrenzung durch Buck-Konverter

Pro	Contra
LED-Strom wird geregelt	Schaltung aufwendig
Hohe Effizienz	Teuer im Verhältnis zu den beiden später genannten Methoden
Je nach Ausführung PWM oder durch andere Verfahren dimmbar	
Am Markt viele fertige Lösungen vorhanden, mit denen stromgetriebene Module betrieben werden können	
Auch für hohe Ströme verfügbar	
Eingangstoleranzen hoch	

Bild 12: Buck-Konverter (Prinzipschaltung)



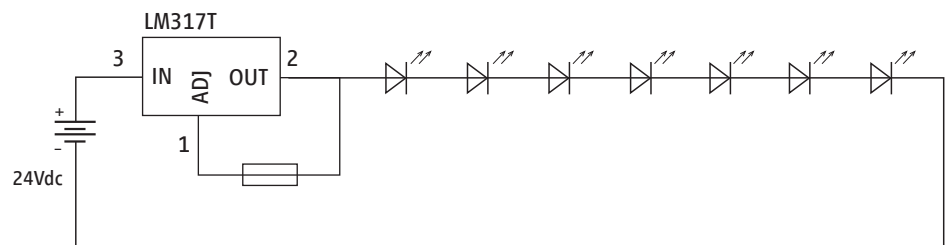
b) Linearregler, Bild 13

können eingesetzt werden, wenn die Ausgangsspannung geringer als die Eingangsspannung ist. Um die Verlustleistung zu begrenzen, sollte die Ausgangsspannung nur geringfügig niedriger als die Eingangsspannung sein.

Tab. 11: Strombegrenzung durch linearen Regler

Pro	Contra
LED-Strom wird geregelt	Geringe Effizienz (Spannungsabfall wird in Wärme umgewandelt)
Einfach zu realisieren	Nur für geringe LED-Ströme geeignet
PWM-dimmbar	

Bild 13: Linearregler



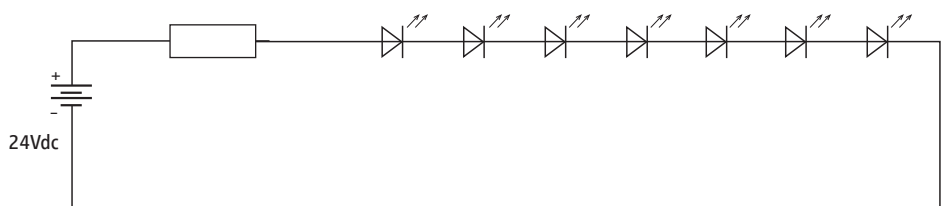
c) Die Strombegrenzung durch ohmschen Widerstand, Bild 14,

findet in der Praxis Anwendung bei LED-Flexbändern, hat aber den Nachteil, hohe Verlustleistung zu erzeugen und Stromschwankungen nicht auszugleichen (keine Regelung).

Tab. 12: Strombegrenzung durch ohmschen Widerstand

Pro	Contra
Günstig	Unstabilität der Helligkeit durch Bauteiltoleranzen (Bsp.: V_f BIN der LEDs), Spannungsschwankungen und Temperatureinwirkungen
Einfach zu realisieren	Ineffizient
PWM-dimmbar	Nur für geringe LED-Ströme geeignet

Bild 14: Strombegrenzung mit Widerstand



9 Schalter und Aktoren

In Beleuchtungsanlagen besteht die Notwendigkeit des Schaltens der Netzspannung. Errichtungsbestimmungen fordern, dass aktive Leiter allpolig abgeschaltet werden (ein- oder zweipolig je nach Netzform). Für Wechselspannung bietet der Installationsmarkt Schalter für jeden beliebigen Zweck in unterschiedlichen Ausführungen.

Ein idealer Schalter ist ein Widerstand, der sich möglichst schnell von einem sehr kleinen Wert auf einen annähernd unendlichen Widerstandswert erhöhen lässt und dabei die Geschwindigkeit der Änderung an die anliegende Spannung anpasst (Abbau der Induktionsspannungen ohne Schädigung von Isolationen im Schaltkreis). In der Realität steigt der elektrische Widerstand des Schalters im Ausschaltvorgang an, Leistung wird zunehmend im Schalter und nicht mehr im Lastwiderstand in Wärme umgesetzt. Sobald der Schaltkreis induktiv ist (Netz oder Last), kommt noch der Abbau der magnetischen Energie hinzu. Die Induktionsspannung treibt einen zusätzlichen Strom in den Schaltkreis. Der Widerstand wird durch den Lichtbogen abgebildet. Der Lichtbogen ist unumgänglich, muss aber für das Schaltgerät beherrschbar bleiben. Die Brenndauer des Lichtbogens sollte möglichst kurz gehalten werden, um die thermische Beanspruchung des Schalters gering zu halten.

In Wechselstromnetzen wird das Löschen des Lichtbogens durch den Nulldurchgang der Netzspannung erreicht. In Gleichstromnetzen müssen zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden, die die erforderliche Lichtbogen Spannung über die vorhandene Spannung anheben.

Da mechanische Schalter beim Einschalten prellen, kommt es auch in der Einschaltphase zu „Ausschaltvorgängen“. Diese sind kritisch, da der Lichtbogen die Kontakte anschmelzen lässt und sich die Kontakte in die Schmelze hineinbewegen. Der Lichtbogen trägt den vollen Laststrom. Bei 10 A Laststrom wird an den Kontakten eine Leistung von ca. 150 W umgesetzt. Die Gefahr der Kontaktverschweißung ist groß.

In einem Versuchsaufbau wurde ein Gleichstrom von ca. 7 A bei 230 V abgeschaltet (Bild 15). Der entstehende Lichtbogen (Bild 16) erlischt nicht und führt unmittelbar zur Zerstörung des Schalters (Bild 17).

Bild 15: Vor Ausschalten

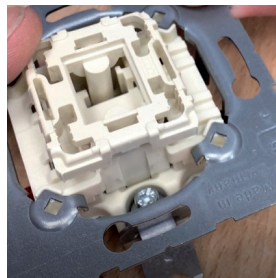


Bild 16: Lichtbogen nach Schalten

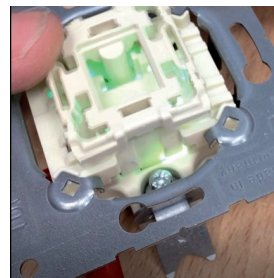
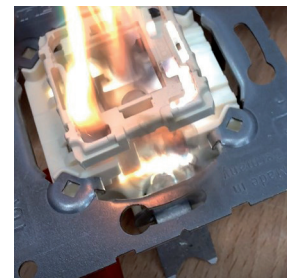


Bild 17: Entzündung nach Lichtbogen



Es zeigt sich eindrucksvoll, dass herkömmliche Installationsschalter für Wechselspannungsnetze nicht zum Schalten von Gleichstrom eingesetzt werden können.

Die Ergebnisse können auf Aktoren und Relais, die ausschließlich zum Schalten von Wechselspannung geeignet sind, übertragen werden.

Einschaltvorgang:

- Prellen der Kontakte
- Lichtbogen
- Verschweißungen
- Bei C-Lasten große Stromstärken in den ersten 100 μs
- Materialwanderung

Ausschaltvorgang:

- Lichtbogen
- Bei L-Lasten große Induktionsspannungen
- Materialeignung (Lichtbogen sollte wandern – die üblichen Kontaktmaterialien sind nicht geeignet)
- Lichtbogen und Brandmelderrelais
- Trennung des Lichtbogens (Schalter mit reduzierten Kontaktabstand)
- Materialwanderung

Schaltmechanismen für DC-Lasten benötigen zusätzliche Bauteile und sind deutlich aufwendiger. Heutige, allein auf AC basierende Bauformen sind bei DC nicht mehr realisierbar.

Aktuelle Installationsschalter würden in DC-Anwendungen einem wesentlich höheren Verschleiß ausgesetzt, die Nenndaten der Schalter müssten entsprechend angepasst (reduziert) werden.

Ein sicheres Trennen des Stromkreises ist schon bei Strömen von ca. 5 A bei 230 V nicht gewährleistet. Der Lichtbogen hat bis zu seinem Verlöschen deutliche Schäden am Schalter hinterlassen.

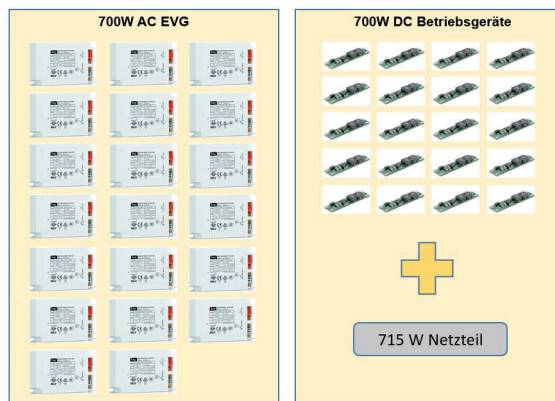
Zum Schalten von Gleichströmen können nur Schaltgeräte verwendet werden, die ausdrücklich für den DC Betrieb ausgewiesen sind.

10 Fazit

Energieeinsparmöglichkeiten bei Leuchten für DC-Netze bestehen allein in der Auslegung des EVG. Bei DC-Netzen kann die Baugruppe PFC-Control sowie der Brückengleichrichter entfallen. Das maximale Energieeinsparpotenzial beträgt zum Beispiel bei einem 50 W EVG nicht mehr als etwa 1 W pro EVG. Ein ersatzweise verwendeter zentraler AC/DC-Wandler kann vergleichsweise effizient ausgeführt werden.

Kosteneinsparungen bestehen im Wesentlichen durch den Wegfall der „PFC + AC/DC“-Baugruppe in den Leuchten mit integrierten LED-Betriebsgeräten (diese Baugruppe wird nur einmal innerhalb des zentralen AC/DC-Betriebsgeräts benötigt). In vielen Fällen kann auf das EVG-Gehäuse verzichtet werden, zudem ist der Platzbedarf des EVG im Vergleich zu herkömmlichen EVG erheblich reduziert. Das Bild 18 zeigt anschaulich die unterschiedlichen Baugrößen der unterschiedlichen Betriebsgeräte.

Bild 18: Gegenüberstellung EVG und DC/DC-Konverter



Anhang

Fachartikel und weitergehende Literatur

DKE/VDE Deutsche Normungsroadmap, Gleichstrom im Niederspannungsbereich, Version 1

Bildquellen:

Bild 1:	Beispiele einer DC-Topologie	LED Linear
Bild 2:	Darstellung eines Bürogebäudes	Trilux
Tab. 1:	Leistungsbedarf	Trilux
Tab. 2:	Leistung/Leiterquerschnitt	Trilux
Bild 3:	230V DC-System	Trilux
Bild 4:	48V DC-System	Trilux
Bild 5:	DC-Beleuchtung eines Einfamilienhauses	LED Linear
Tab. 3:	Leuchtenkonfiguration Einfamilienhaus	LED Linear
Tab. 4:	Leistungsbedarf Beleuchtungsanlage	LED Linear
Bild 6:	Beispiel für Shop-Beleuchtung mit Spannungsversorgung DC 48 V und DC 380 V	Christian Miesner
Tab. 5:	Übersicht Leitungslänge, Anschlussleistung und -strom, Verluste	Christian Miesner
Bild 7:	DC-Kurzschlussabschaltung	Roman Ott
Bild 8:	DC-Überlastabschaltung	Roman Ott
Tab. 6:	Geräteschutzsicherungen nach IEC 60127 (G-Sicherungen)	Eska
Tab. 7:	Niederspannungssicherungen nach IEC 60269	Eska
Tab. 8:	Übersicht weiterer Normen für Sicherungen	Eska
Bild 9:	Aufbau Leitungsschutzschalter	Roman Ott
Bild 10:	Auslösekennlinie Leitungsschutzschalter	Roman Ott
Tab. 9:	Übersicht DC-Spannungen	Roman Ott
Bild 11:	Anlagenaufbau CPS/LPS	Inotec
Tab. 10:	Strombegrenzung durch Buck-Konverter	Trilux
Bild 12:	Buck-Konverter (Prinzipschaltung)	Ridi
Tab. 11:	Strombegrenzung durch linearen Regler	Trilux
Bild 13:	Linearregler	Ridi
Tab. 12:	Strombegrenzung durch ohmschen Widerstand	Trilux
Bild 14:	Strombegrenzung mit Widerstand	Ridi
Bilder 15, 16 und 17:	Schalter vor Ausschalten, Lichtbogen nach Schalten, Entzündung nach Lichtbogen	Trilux
Bild 18:	Gegenüberstellung EVG und DC/DC-Konverter	Trilux



ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e.V.

Lyoner Straße 9
60528 Frankfurt am Main

Telefon: +49 69 6302-0

Fax: +49 69 6302-317

E-Mail: zvei@zvei.org

www.zvei.org