

# Überblick zur Errichtung von DC-Niederspannungsinstallations

VDE SPEC 90024 V1.0 (de)

## Vorwort

Veröffentlichungsdatum dieser VDE SPEC: 10.06.2026.

Zur vorliegenden VDE SPEC wurde kein Entwurf veröffentlicht.

Dieses Dokument wurde vom nationalen Arbeitsgremium DKE/AK 221.6.3: *Schutzmaßnahmen bei DC Anwendungen* der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik ([www.dke.de](http://www.dke.de)) erarbeitet.

Diese VDE SPEC wurde nach dem VDE-SPEC-Verfahren erarbeitet. Die Erarbeitung dieser VDE SPEC erfolgte innerhalb der Projektgruppe des DKE/AK 221.6.3 und nicht zwingend unter Einbeziehung aller interessierten Kreise.

Diese VDE SPEC ist **nicht** Bestandteil des VDE-Vorschriftenwerks oder des Deutschen Normenwerks. Diese VDE SPEC ist insbesondere auch **keine** Technische Regel im Sinne von § 49 EnWG.

Verfasser dieser VDE SPEC sind:

- Hormmeyer, Bernd; Ingenieurbüro Hormmeyer
- Hußmann, Jörg; Siemens
- Jahn, Dr. Ilka; RWTH
- Janssen, Jörn; Doepke Schaltgeräte
- Kaharevic, Amila; RWTH
- Kahl, Walter; ABB
- Koch, Michael; Eaton Industries
- Köpf, Hendrik; E-T-A
- Kühn, Andreas; Jean Müller
- Künzig, Thorsten L.; BMW
- Linke, Ludwig; DB
- Loef, Christoph (†); RWTH
- Luber, Georg; Siemens
- Lürkens, Dr. Peter; RWTH
- Massat, Hans-Joachim; Siemens
- Meckler, Peter; E-T-A
- Muhm, Helmut; Bender
- Müller, Stefan; VW
- Niedenzu, Wolfgang; Siemens
- Potdevin, Holger; Siemens
- Rückertl, Dr. Christian; BG ETEM
- Rüdell, Ludwig; Danfoss
- Schulte, Holger; Wöhner
- Schulze, Burkhard; ZVEH, Elektro-Schulze
- Schura, Markus; Jean Müller
- Schüssele, Hans-Dieter; Fluke Deutschland
- Siedelhofer, Bernd
- Stammberger, Dr. Hartwig; Eaton Industries
- Stasch, Oliver; Eaton Industries
- Wagner, Carina; Eaton Electric
- Wille, Gregor; Hager Electro

- Wolf, Torsten; Jean Müller
- Wunder, Bernd; Fraunhofer IISB
- Zeyen, Michael; vancom
- Ziebell, Claus-Dieter; ZVEH

Trotz großer Anstrengungen zur Sicherstellung der Korrektheit, Verlässlichkeit und Präzision technischer und nicht-technischer Beschreibungen kann die VDE SPEC-Projektgruppe weder eine explizite noch eine implizite Gewährleistung für die Korrektheit des Dokuments übernehmen. Die Anwendung dieses Dokuments geschieht in dem Bewusstsein, dass die VDE SPEC-Projektgruppe für Schäden oder Verluste jeglicher Art nicht haftbar gemacht werden kann. Die Anwendung der vorliegenden VDE SPEC entbindet den Nutzer nicht von der Verantwortung für eigenes Handeln und geschieht damit auf eigene Gefahr.

Im Zuge der Herstellung und/oder Einführung von Produkten in den Europäischen Binnenmarkt muss der Hersteller eine Risikoanalyse durchführen, um zunächst festzustellen, welche Risiken das Produkt möglicherweise mit sich bringt. Nach Durchführung der Risikoanalyse bewertet er diese Risiken und ergreift gegebenenfalls geeignete Maßnahmen, um die Risiken wirksam zu eliminieren oder zu minimieren (Risikobewertung). Die vorliegende VDE SPEC entbindet den Nutzer nicht von dieser Verantwortung.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. DIN, VDE und DKE sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

# Inhalt

<b>Einleitung</b>	<b>6</b>
<b>1 Anwendungsbereich</b>	<b>6</b>
<b>2 Normative Verweisungen</b>	<b>6</b>
<b>3 Begriffe</b>	<b>8</b>
<b>4 Symbole und Abkürzungen</b>	<b>9</b>
<b>5 Spannungsbereiche und Anwendungen</b>	<b>10</b>
5.1 Allgemeines	10
5.2 Industrienetze	10
5.3 Büro- und Wohngebäude	13
5.4 Rechenzentren	13
5.5 Ladeparks für die Elektromobilität	14
<b>6 Merkmale der Stromversorgung</b>	<b>14</b>
<b>7 Erdung</b>	<b>15</b>
7.1 Definitionen der Netzsysteme	15
7.2 Erdung über das AC-Netz	17
7.3 Wechsel in den Inselbetrieb	18
7.4 DC-Korrosionseffekte bei Mehrfacherdung	20
<b>8 Schutzmaßnahmen</b>	<b>23</b>
8.1 Allgemeines	23
8.2 Schutz gegen elektrischen Schlag	24
8.3 Schutz gegen thermische Auswirkungen	25
8.4 Schutz bei Überstrom (DIN VDE 0100-430 (VDE 0100-430))	25
8.5 Schutz bei Überspannungen	29
<b>9 Auswahl der Betriebsmittel</b>	<b>29</b>
9.1 Allgemeines	29
9.2 Allgemeine Bestimmungen nach DIN VDE 0100-510 (Strom, Spannung, Leistung, äußere Einflüsse, ...)	29
9.3 Betriebsmittel zum Schutz gegen elektrischen Schlag	29
9.4 Betriebsmittel zum Schutz gegen thermische Auswirkungen	30
9.5 Betriebsmittel zum Schutz bei Überströmen	30
9.6 Betriebsmittel zum Schutz bei Überspannungen	36
9.7 Betriebsmittel zum Trennen und Schalten	36
9.8 Steckverbinder/Steckvorrichtung	36
<b>10 Bestimmung der maximalen Kabel- und Leitungslängen</b>	<b>36</b>
10.1 Schleifenimpedanz bei AC-seitiger Erdung	36
10.2 Spannungsfall	39
10.3 Berücksichtigung der Schleifeninduktivität bei Halbleiter-Leistungsschaltern	41
<b>11 Erstprüfung von elektrischen Anlagen nach DIN VDE 0100-600</b>	<b>41</b>

11.1	Besichtigung	41
11.2	Erproben und Messen	41
11.3	Prüfprotokolle	42

## **12 Funktionale Aspekte** **43**

12.1	Regelkennlinien (droop curves)	43
12.2	Vorladung von Geräten im DC-Netz	43

## **Anhang A Forschungsaktivitäten zum elektrischen Schlag Gefährdung durch DC-Körperdurchströmung** **46**

### **Literaturhinweise** **48**

### **Abbildungsverzeichnis**

Bild 5.1	– Übliche Nennspannungen für DC-Anwendungen	10
Bild 5.2	– Spannungsbänder und Grenzwerte für industrielle Netze, angelehnt an [4]	11
Bild 5.3	– Betriebsstatus abhängig von Spannung und Zeitdauer für industrielle Netze, angelehnt an [4]	12
Bild 5.4	– Globale LVDC-Aktivitäten – eine Auswahl [10]	13
Bild 5.5	– Vergleich AC und DC-Versorgung von Rechenzentren [12]	14
Bild 7.1	– Unsymmetrisches TN-S-DC-System ohne Mittelpunktleiter	15
Bild 7.2	– TN-S-DC-System mit Mittelpunktleiter	16
Bild 7.3	– IT-DC-System ohne Mittelpunktleiter	16
Bild 7.4	– IT-DC-System mit Mittelpunktleiter	17
Bild 7.5	– AC-seitig geerdetes DC-Netz	18
Bild 7.6	– Funktionsprinzip einer temporären Mittelpunkterdung an einem symmetrischen DC/DC Wandler in einem DC-Netz [11]	20
Bild 7.7	– Schematische Darstellung von Streuströmen bei hart geerdetem DC-Netz [11]	21
Bild 8.1	– Kennwerte im Kurzschlussfall	27
Bild 8.2	– Veranschaulichungen zur Selektivität	28
Bild 9.1	– Prinzip-Schaltbild eines einpoligen Hybrid-Leistungsschalters [8]	31
Bild 9.2	– Prinzip-Schaltbild eines einpoligen Halbleiterschalters [9]	32
Bild 9.3	– Auslösekennlinie eines Halbleiterschalters [Eaton]	33
Bild 9.4	– Vereinfachtes Ersatzschalbild einer Leitungsnachbildung	34
Bild 9.5	– Vereinfachtes Ersatzschalbild einer Leitungsnachbildung im Kurzschlussfall	34
Bild 10.1	– Ersatzschaltbild für Erdschlussfehler bei AC-seitiger Erdung	37
Bild 10.2	– Spannungsfälle nach NAV, DIN 18015-1 und DIN VDE 0100-520	39
Bild 10.3	– Spannungsfall in Anlehnung an DIN VDE 0100-520, Beiblatt 2	39
Bild 12.1	– Beispielhafte Regelkennlinien verschiedener Netzteilnehmer mit aktiver Leistungsregelung	43
Bild 12.2	– Übersicht über die Vorladeebenen	44
Bild 12.3	– Sequenzielle Vorladung	44

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 9.1 – Eigenschaften verschiedener Schutzgeräte bei Kurz- und Erdschluss, um Unterspannung zu vermeiden	30
Tabelle 9.2 – Typische Zeitkonstanten in DC-Stromkreisen (Quelle Sicherungshandbuch Dr. Bessei S.50 [24])	35
Tabelle 9.3 – Typische Zeitkonstanten L/R der Leitungen	35
Tabelle 10.1 – Spannung der Erdfehlerschleife bei AC-seitiger Erdung	37
Tabelle 10.2 – Spannung der Erdfehlerschleife bei AC-seitiger Erdung	38
Tabelle 10.3 – Maximale Kabel- und Leitungslänge für Kabel und Leitungen der Klasse 1 und 2 nach DIN EN 60228 (VDE 0295) bei DC	40
Tabelle 10.4 – Maximale Kabel- und Leitungslänge für Kabel und Leitungen der Klasse 5 und 6 nach DIN EN 60228 (VDE 0295) bei DC	41

## Einleitung

Eine Motivation für DC-Systeme kommt aus dem Industriebereich. In Industriebereichen gibt es viele elektrische Antriebe, die mit Frequenzumrichtern betrieben werden. Diese haben bereits intern einen DC-Zwischenkreis. Speicher, wie z. B. Batteriesysteme, und Photovoltaik nutzen bzw. erzeugen bereits direkt DC. Die rapide Weiterentwicklung von Leistungselektronik macht DC/DC-Wandlung einfacher und effizienter. Daher liegt es nahe, diese DC-Systeme miteinander zu verbinden. Dies ermöglicht die direkte Nutzung von Rekuperationsenergie von bewegten Massen innerhalb des Gleichstromnetzes, anstatt Bremsenergie in Widerständen abzuführen. Die Speicher bieten Back-up-Energie und -Leistung für Stromausfälle, wodurch Ausfallzeiten erheblich reduziert werden. Die gespeicherte Energie bietet auch eine effiziente Möglichkeit, die Einspeisung von Strom aus dem AC-Versorgungsnetz zu reduzieren. Dies führt zu geringerem Investitionsaufwand (kleinere Trafos, geringere Leitungsquerschnitte) und zu dauerhaft reduzierten Energiepreisen, die in der Industrie an die Spitzenlast gekoppelt sind. In DC-Anlagen entfallen darüber hinaus die Filter- und Kompensationsanlagen, die für die Einhaltung der Netzqualität am Netzanschlusspunkt erforderlich sind und die mit zunehmendem Einsatz von Frequenzumrichtern aufwändiger werden.

## 1 Anwendungsbereich

Diese VDE SPEC dient als Übersicht zur Planung und Errichtung von Niederspannungs-Gleichstromnetzen von 60 V DC bis 1 500 V DC im Rahmen des Anwendungsbereichs der Reihe DIN VDE 0100. Diese finden z. B. Anwendung in den Bereichen industrieller Energieverteilung, in Rechenzentren sowie in Gebäuden. Dieses Dokument zeigt auf, welche Lösungen und Betriebsmittel für Gleichstromanwendungen bereits existieren und welche Normen relevant sind.

Für den Betrieb elektrischer Gleichstromanlagen kann die DIN VDE 0105-100 angewendet werden.

Dieser Leitfaden selbst wird keine Anforderungen aufstellen und keine neuen Anforderungen beschreiben.

## 2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in Bezug genommen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 18014, *Erdungsanlagen für Gebäude – Planung, Ausführung und Dokumentation*

DIN 18015-1, *Elektrische Anlagen in Wohngebäuden – Teil 1: Planungsgrundlagen*

DIN EN 50162 (VDE 0150), *Schutz gegen Korrosion durch Streuströme aus Gleichstromanlagen*

DIN EN 60909-0 (VDE 0102), *Kurzschlussströme in Drehstromnetzen – Teil 0: Berechnung der Ströme*

DIN EN 61140 (VDE 0140-1), *Schutz gegen elektrischen Schlag – Gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel*

DIN EN 61557-8 (VDE 0413-8), *Elektrische Sicherheit in Niederspannungsnetzen bis AC 1 000 V und DC 1 500 V – Geräte zum Prüfen, Messen oder Überwachen von Schutzmaßnahmen – Teil 8: Isolationsüberwachungsgeräte für IT-Systeme*

DIN EN 61643-31 (VDE 0675-6-31), *Überspannungsschutzgeräte für Niederspannung – Teil 31: Anforderungen und Prüfungen für Überspannungsschutzgeräte in Photovoltaik-Installationen*

DIN EN 61984 (VDE 0627):2009-11, *Steckverbinder, Sicherheitsanforderungen und Prüfungen*

DIN EN 62305 (VDE 0185-305) (ganze Reihe), *Blitzschutz*

DIN EN IEC 63112 (VDE 0126-112), *Photovoltaik (PV)-Generatorfelder – Einrichtungen zum Erdschlusschutz – Sicherheit und sicherheitsrelevante Funktionalität*

DIN VDE 0100-100 (VDE 0100-100), *Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 1: Allgemeine Grundsätze, Bestimmungen allgemeiner Merkmale, Begriffe*

DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410), *Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 4-41: Schutzmaßnahmen – Schutz gegen elektrischen Schlag*

DIN VDE 0100-420 (VDE 0100-420), *Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 4-42: Schutzmaßnahmen – Schutz gegen thermische Auswirkungen*

DIN VDE 0100-430 (VDE 0100-430), *Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 4-43: Schutzmaßnahmen – Schutz bei Überstrom*

DIN VDE 0100-443 (VDE 0100-443), *Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 4-44: Schutzmaßnahmen – Schutz bei Störspannungen und elektromagnetischen Störgrößen – Abschnitt 443: Schutz bei transienten Überspannungen infolge atmosphärischer Einflüsse oder von Schaltvorgängen*

DIN VDE 0100-510 (VDE 0100-510), *Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 5-51: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Allgemeine Bestimmungen*

DIN VDE 0100-520 (VDE 0100-520), *Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 5-52: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Kabel- und Leitungsanlagen*

DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530), *Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 530: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Schalt- und Steuergeräte*

DIN VDE 0100-534 (VDE 0100-534), *Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 5-53: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Trennen, Schalten und Steuern – Abschnitt 534: Überspannungs-Schutzeinrichtungen (SPDs)*

DIN VDE 0100-600 (VDE 0100-600), *Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 6: Prüfungen*

DIN VDE 0105-100 (VDE 0105-100), *Betrieb von elektrischen Anlagen – Teil 100: Allgemeine Festlegungen*

DIN VDE 0298-4 (VDE 0298-4), *Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen – Teil 4: Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen für feste Verlegung in und an Gebäuden und von flexiblen Leitungen*

E DIN VDE 0100-534/A2 (VDE 0100-534/A2), *Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 5-53: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Trennen, Schalten und Steuern – Abschnitt 534*

ETSI EN 300 132-3-1 V2.1.1, *Environmental Engineering (EE); Power supply interface at the input to telecommunications and datacom (ICT) equipment; Part 3: Operated by rectified current source, alternating current source or direct current source up to 400 V; Sub-part 1: Direct current source up to 400 V*

HD 60364-5-52, *Low-voltage electrical installations – Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment – Wiring systems*

IEC 60269-1, *Low-voltage fuses – Part 1: General requirements*

IEC 60364-1, *Low-voltage electrical installations – Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions*

IEC 60364-4-41, *Low-voltage electrical installations – Part 4-41: Protection for safety – Protection against electric shock*

IEC 60364-4-43, *Low-voltage electrical installations – Part 4-43: Protection for safety – Protection against overcurrent*

IEC 60364-8-82, *Low-voltage electrical installations – Part 8-82: Functional aspects - Prosumer's low-voltage electrical installations*

IEC 60479-1, *Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects*

IEC 60479-2, *Effects of current on human beings and livestock – Part 2: Special aspects*

IEC 60898-2, *Electrical accessories – Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations – Part 2: Circuit-breakers for AC and DC operation*

IEC 60947-10 ED1 in Vorbereitung

IEC 60947-2, *Low-voltage switchgear and controlgear – Part 2: Circuit-breakers*

IEC 61140, *Protection against electric shock – Common aspects for installation and equipment*

IEC 61439-2, *Low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Part 2: Power switchgear and controlgear assemblies*

IEC 61557-3, *Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V AC and 1 500 V DC – Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures – Part 3: Loop impedance*

IEC 61643-21, *Low voltage surge protective devices – Part 21: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks – Performance requirements and testing methods*

IEC 61643-41, *Low-voltage surge protective devices – Part 41: Surge protective devices connected to DC low-voltage power systems – Requirements and test methods*

IEC 61851-23, *Electric vehicle conductive charging system – Part 23: DC electric vehicle supply equipment*

IEC 63112, *Photovoltaic (PV) arrays – Earth fault protection equipment – Safety and safety-related functionality*

IEC 63464-1 Ed 1 (in Vorbereitung), *Protective devices based on semiconductor technology for household and similar use – Part 1: Semiconductor Residual current operated Circuit-Breakers with integral Overcurrent protection for household and similar uses (SC-RCBOs)*

IEC/TR 61641, *Enclosed low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Guide for testing under conditions of arcing due to internal fault*

IEC/TS 63107, *Integration of internal arc-fault mitigation systems in power switchgear and controlgear assemblies (PSC-Assemblies) according to IEC 61439-2*

IEC/TR 63282 Ed.2, *LVDC systems – Assessment of standard voltages and power quality requirements*

VDE-AR-E 2510-2 *Anwendungsregel, Stationäre elektrische Energiespeichersysteme vorgesehen zum Anschluss an das Niederspannungsnetz*

### 3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

DIN und DKE stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>
- DKE-IEV: verfügbar unter <https://www.dke.de/DKE-IEV>

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Plattform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>

#### 3.1

##### **Nennspannung (nominal voltage)**

IEV Nr. 826-11-01

Spannung, durch die die elektrische Anlage oder ein Teil der elektrischen Anlage gekennzeichnet ist

#### 3.2

##### **Nennspannung eines Netzes (nominal voltage of a system)**

IEV Nr. 601-01-21

geeigneter, gerundeter Spannungswert zur Bezeichnung oder Identifikation eines Netzes

#### 3.3

##### **Bemessungsspannung (rated voltage)**

IEV Nr. 442-09-10

Bemessungswert der Spannung, der vom Hersteller für ein Bauelement, ein Gerät oder ein Betriebsmittel festgelegt wurde und sich auf die Betriebs- und Leistungsmerkmale bezieht

#### 3.4

##### **Betriebsspannung (operating voltage)**

IEV Nr. 601-01-22

Spannungswert bei Normalbetrieb zu einem bestimmten Zeitpunkt an einer bestimmten Stelle des Netzes

### 3.5

#### Versorgungsspannung (supply voltage)

IEV Nr. 614-01-03

Effektivwert der Spannung oder, soweit zutreffend, Wert der Gleichspannung zu einem gegebenen Zeitpunkt an einer Übergabestelle, gemessen über ein gegebenes Zeitintervall

## 4 Symbole und Abkürzungen

Symbol	Beschreibung
AIC	Active Infeed Converter (Bidirektionaler Umrichter AC/DC zur Verbindung des DC-Netzes mit dem AC-Versorgungsnetz)
DC-Abzweig	Abzweig zwischen DC-Netz und DC-Sektor ggf. mit einem schnellen Überstromschutz
DC-Sektor	Gruppe von Geräten, die zusammen eine funktionale Einheit bilden und über einen gemeinsamen DC-Abzweig ans DC-Netz geschaltet werden
RCD	Residual Current protective Device (Fehlerstrom-Schutzeinrichtung)
IMD	Insulation Monitoring Device (Gerät zur Isolationsüberwachung)

## 5 Spannungsbereiche und Anwendungen

### 5.1 Allgemeines

Bild 5.1 zeigt übliche Nennspannungen von DC-Anwendungen und ihre Einordnung in die Spannungsebenen.

ÜBERSICHT ZU GLEICHSPANNUNGSNETZEN				
DC Nennspannung in Volt	Genutzte Anwendungen und Einsatzgebiete	DC Spannungsebenen/-bereiche		
100.000-800.000	Hochspannungs- Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)	Mittelspannung	Hochspannung	
11.000-50.000	Großantriebe			
3.000	Vollbahnfahrzeuge mit Oberleitungen			
1.500	Fahrspannung für U-Bahn oder Straßenbahn (mit Oberleitungen)	Kleinspannung	Niederspannung	
800	Spannung von Akku's bei Elektrostraßenfahrzeugen			
540/650	DC Netz Nennspannung im industriellen Bereich (z.B. DC-Industrie)			
600/750	Fahrspannung für U-Bahn oder Straßenbahn (mit Oberleitungen)			
400	Spannung von Akku's bei Elektrostraßenfahrzeugen ( BEV und PHEV )			
380	DC Grid Systeme im Data Center / vorgesehen auch für DC-Netze in der			
270 (540)	Flugzeugbordnetz (+270/-270)			
≤ 120 V	Kleinspannung (engl. Extra Low Voltage)			Kleinspannung
110	Bordnetz in Nahverkehrszügen			
48/60	Data Center und Telekom ( USV )			Sicherheitskleinspannung (z.B. SELV oder PELV)
48	Bordnetz bei Hybridelektrofahrzeugen / Flurförderzeuge			
14/28	Kleinflugzeuge Bordnetz			
24	LKW- und Nutzfahrzeuge Bordnetz			
12	Campingausrüstung und PKW Bordnetz			
5	USB (es können bei USB-PD auch 12 bis 20 V möglich sein)			

Bild 5.1 – Übliche Nennspannungen für DC-Anwendungen

### 5.2 Industrienetze

Diese Beschreibung basiert auf dem Systemkonzept der Forschungsprojekte DC-INDUSTRIE und DC-INDUSTRIE2 [11].

Der ZVEI hat zusammen mit der Initiative DC-INDUSTRIE in einem Positionspapier die Vorteile eines industriellen DC-Netzes beschrieben [3]: „In der Industrie entfallen 70 Prozent des Stromverbrauchs auf Elektromotoren. Damit sind diese der mit Abstand größte Verbraucher elektrischer Energie. Durch das Rückspeisen der Motorbremsenergie, auf den DC-Bus und dem Aufladen der Energiespeicher wird ebenfalls die Gesamtenergie des Systems reduziert.“

Jede Reduzierung der Leistungsaufnahme dieser Antriebe durch Wirkungsgradsteigerungen bedeutet auch eine entsprechende Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Seit dem Jahr 2021 müssen alle in der EU verkauften Drehstrommotoren die Anforderungen der Energieeffizienzklasse IE2 bis IE4 erfüllen<sup>1</sup>. Die Effizienzklassen werden auf Basis der Nenndrehzahl und des Nenndrehmoments eines Elektromotors definiert, d. h. für einen Betriebspunkt, der meistens nicht praxisrelevant ist. Damit steigen die Kosten und der Ressourcenverbrauch bei der Herstellung von Elektromotoren, aber die erwartete Reduktion des Energieverbrauchs wird nicht erreicht.

**Für drehzahlveränderliche Antriebe ist ein bewährter Ansatz zum Erreichen einer höheren Energieeffizienz der Einsatz von Frequenzumrichtern. Da die Frequenzumrichter ohnehin intern einen Gleichstromkreis nutzen, ist es sinnvoll diesen direkt mit dem DC-Netz zu verbinden, um so unnötige Umwandlungsverluste zu vermeiden. Damit kann Bremsenergie unmittelbar durch andere Verbraucher genutzt werden.**

Bei einer Nennspannung von 540 V DC bzw. 650 V DC liegt die Gleichspannung im Bereich von 485 V bis 750 V, abhängig von der Art der Spannungsregelung (aktiv oder passiv). Für bis zu 60 s können Komponenten mit eingeschränkter Funktionalität bis zur Spannung U4 (800 V) betrieben werden<sup>2</sup>. Mit diesem Spannungsbereich ist sichergestellt, dass weitgehend Standardtechnologien und -

<sup>1</sup> Verordnung der Kommission EU 2019/1781 zur Festlegung neuer Anforderungen an Elektromotoren und Frequenzumrichter

<sup>2</sup> Damit ist die Bemessungsspannung der Geräte die Spannung U4 (800 V), siehe Bild 5.1 und Bild 5.2.

komponenten verwendet werden können. Bei Überschreiten der oberen Spannungsgrenze von 800 V bzw. bei Unterschreiten der unteren Grenze von 400 V wird das Netz abgeschaltet. In Anlehnung an den technischen Report IEC/TR 63282 [4] sind die im Report definierten Spannungsbänder im Projekt beschrieben worden, wie in Bild 5.2 dargestellt. Für diese Spannungsbänder beschreibt Bild 5.3 in Abhängigkeit von Spannungsgrenzwerten und Zeiten die Betriebsstatus. Nur im nominellen Spannungsband B3 (grün) ist ein dauerhafter Betrieb vorgesehen.

	Nennspannung: 540 V	Nennspannung: 650 V
<b>Verbotenes Band</b>		
<b>B7</b>	- Geräteschädigung äußerst wahrscheinlich	
<b>U6</b> <span style="float: right;"><b>2000 V</b></span>		
<b>B6</b>	<b>Überspannungsschutz Band</b> - Spannungen können durch Schalthandlungen auftreten - Überspannungsschutzorgane begrenzen die Spannung so, dass dieser Bereich nicht überschritten wird.	
<b>U5</b> <span style="float: right;"><b>880 V</b></span>		
<b>B5</b>	<b>Temporäres Überspannungsband</b> - Überspannungsschutzorgane sind <b>nicht</b> aktiv - Die Abschaltung bei zu hoher Spannung erfolgt durch den DC-Abzweig - Geräteisolation und Bauteile müssen das für mindestens 5 s ertragen - Geräte dürfen ihre Funktion verlieren, um sich selber zu schützen	
<b>U4</b> <span style="float: right;"><b>800 V</b></span>		
<b>B4</b>	<b>Überspannungsband</b> - Geräte dürfen ihre Leistung reduzieren - dieser Zustand soll nicht länger als 60s dauern - Maßnahmen zur Spannungsreduktion müssen getroffen werden (z.B. Leistungswiderstände einschalten)	
<b>U3</b> <span style="float: right;"><b>750 V</b></span>		
<b>B3</b>	<b>Nominales Band</b> - normaler Arbeitsbereich - Geräte müssen dauerhaft betrieben werden können - Geräte liefern Bemessungsleistung	
<b>U2</b> <span style="float: right;"><b>485 V</b> <span style="margin-left: 100px;"><b>620 V</b></span></span>		
<b>B2</b>	<b>Notfallband (Emergency Band)</b> - Es herrscht große Überlast - Last muss unbedingt reduziert werden - AICs dürfen hier nur wenige ms betrieben werden	
<b>U1</b> <span style="float: right;"><b>400 V</b></span>		
<b>B1</b>	<b>Unterspannungsausfall-Band (Blackout Band)</b> - DC-Abzweige sind geöffnet - wird beim Vorladen durchfahren - tritt kurzzeitig bei Kurzschlüssen auf	

Bild 5.2 – Spannungsbänder und Grenzwerte für industrielle Netze, angelehnt an [4]

Obere Spannungsgrenze U <sub>x</sub> im DC-Netz für Nennspannung 540 V / 650 V		Spannungs- band	S1: t < 50 µs	S2: 50 µs ≤ t ≤ 1 ms	S3a: 1 ms ≤ t ≤ 5 s	S3b: 5 s ≤ t ≤ 60 s	S4: t > 60 s
Spannung ↑	U6: 2000 V →	B7	A7				
	U5: 880 V	B6	A6	A7			
	U4: 800 V	B5	A4	A5	A5	A7	A7
	U3: 750 V	B4	A3	A3	A3	A4	A5
	U2: 485 / 620 V	B3	A3	A3	A3	A3	A3
	U1: 400 V →	B2	A4	A4	A2	A2	A2
		B1	A4	A2	A1	A1	
			Zeit →				

Bild 5.3 – Betriebsstatus abhängig von Spannung und Zeitdauer für industrielle Netze, angelehnt an [4]

Die Betriebsstatus aus Bild 5.3 sind wie folgt beschrieben:

- **A7: Verbotener Status**
  - Schädigung von Geräten ist sehr wahrscheinlich
  - Dieser Status muss vermieden werden
- **A6: Überspannungsschutzorgane SPDs aktiv**
  - Überspannungsschutzorgane sind im Eingriff und begrenzen die Spannung auf ≤U<sub>6</sub>
  - Überspannungsschutzorgane dürfen nur kurzzeitig arbeiten, da sonst Überhitzung droht
  - Geräte dürfen sich zum Eigenschutz abschalten
  - Schutz der Geräte kann nicht 100%ig sichergestellt werden
- **A5: Überspannung: SPDs nicht aktiv**
  - Spannung ist zu hoch, wird aber nicht durch Überspannungsschutzorgane geklemmt
  - Geräte dürfen sich zum Eigenschutz abschalten
- **A4: Abnormaler Status**
  - Geräte müssen das aushalten
  - Geräte müssen weiterarbeiten
  - Geräte dürfen Leistung reduzieren
- **A3: Normaler Arbeitsbereich**
  - Geräte müssen ihre Bemessungsleistung bringen
- **A2: Akute Unterspannung**
  - Die Quellen können den nötigen Energiebedarf nicht decken
  - Geräte müssen weiterarbeiten
  - Geräte dürfen Leistung reduzieren
  - Eventuell Lastabwurf zur Stabilisierung des Systems
  - Wenn Versorger eine Verbindung zum AC-Netz haben, dürfen sich diese bei zu hohen Strömen zum Eigenschutz abschalten

- **A1: Blackout- Status**
- Abschalten der Geräte
- Eventuell Neustarten der Vorladung

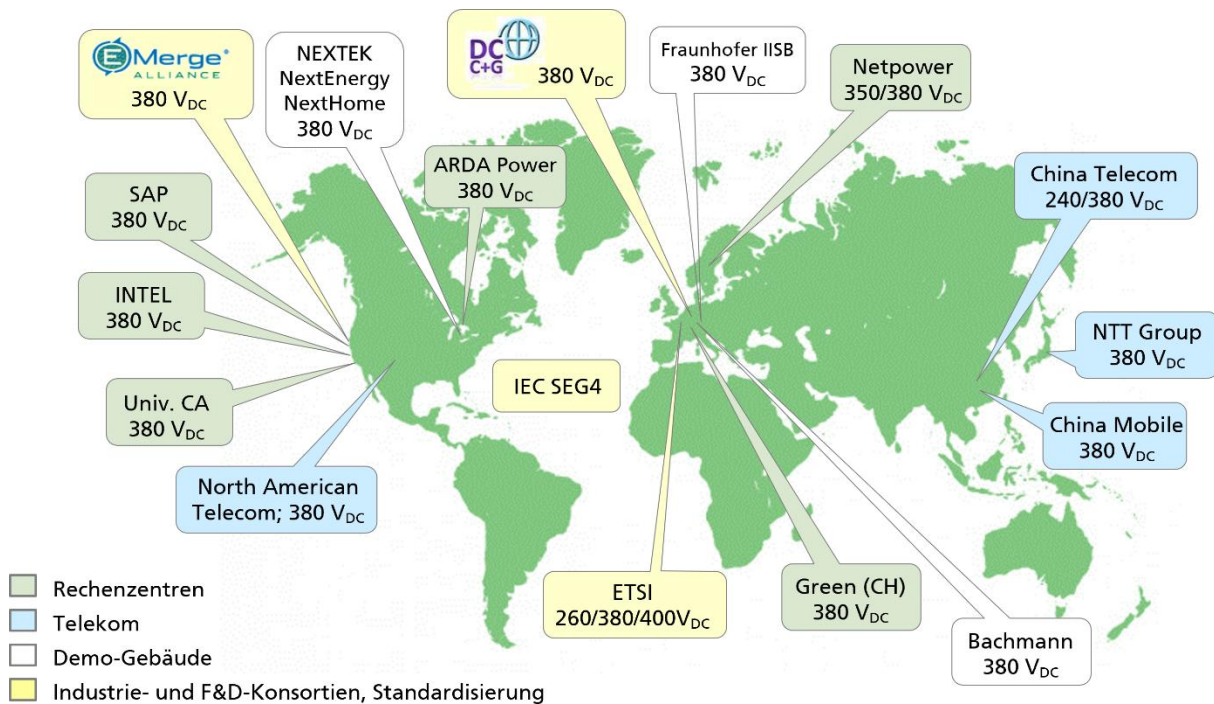
Die aktiven Komponenten im DC-Netz sorgen für die kontinuierliche Balance zwischen Energieangebot und Energienachfrage. Dazu wird regelmäßig die Spannung gemessen und mit einer vorgegebenen Strom-Spannungs-Kennlinie (*droop curve*) verglichen. Eine Speicherregelung sorgt dafür, dass die Speicher immer optimal geladen werden respektive entladen werden können. Mit diesen Kennlinien kann auch die Priorität der mit Strom zu versorgenden Geräte gesteuert werden. So werden z. B. kritische Anwendungen im gesamten Spannungsbereich vorrangig versorgt, während nachrangige Verbraucher bei geringerem Energieangebot abgeschaltet werden können.

### 5.3 Büro- und Wohngebäude

Bei dieser Anwendung werden erwartungsgemäß Gleichspannungen im Bereich bis zu einer Nennspannung von 400 V DC verwendet.

Dabei zeichnet sich ab, dass ein Spannungsniveau von 380 V DC für die Gleichstromverteilung in Gebäuden geeignet ist. In einzelnen Anwendungen könnten sich auch deutlich kleinere Spannungen (z. B. 24 V DC) als Standard etablieren, um Betriebsmittel mit geringer Leistung zu versorgen.

Diese 380 V sind, wie die Karte weltweiter Umsetzungsbeispiele und Normungsaktivitäten (Bild 5.4) zeigt, derzeit dabei, sich zu einem globalen Standard zu entwickeln. In einigen Anwendungsfeldern, wie der Telekommunikations- und Datentechnik existieren bereits einschlägige Normen [11].



**Bild 5.4 – Globale LVDC-Aktivitäten – eine Auswahl [10]**

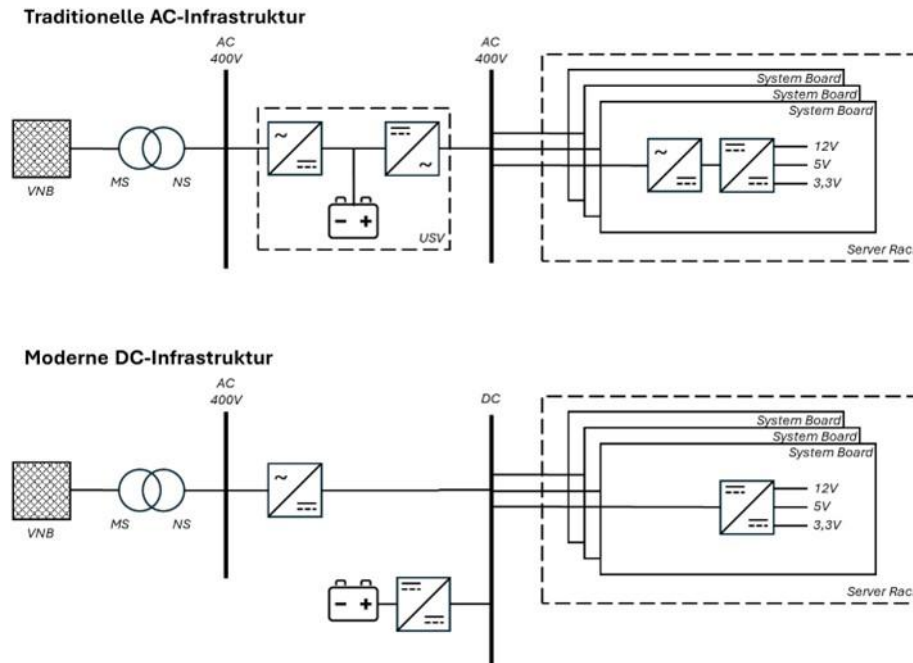
Die Emerge Alliance (<https://www.emergealliance.org/>), vorwiegend im nordamerikanischen Raum aktiv, hat dort für die kommerziellen Gebäude und sogenannten „Community Microgrids“ Spannungen von 380 V DC für die Verteilung im Gebäude für IT-Equipment standardisiert und im SELV-Bereich (z. B. 24 / 48 V) z. B. für die LED-Beleuchtung.

### 5.4 Rechenzentren

Es gibt bereits Rechenzentren, die mit Gleichspannung betrieben werden – siehe Bild 5.5. Dies wird vorwiegend gemacht, wenn erneuerbare Energien, wie PV-Anlagen, mit eingebunden werden sollen. USV-Anlagen neuester Generation erlauben den direkten Anschluss von PV- oder Windkraft-Anlagen an die USV-Anlage, die ihrerseits die generierte Gleichspannung mit der Batteriezwischenkreisspannung koppelt und die Gleichspannung am Ausgang entsprechend regelt. Gegenüber der klassischen 230 V Wechselspannung kann durch Reduzierung der Leitungsverluste, Umwandlungsverluste in USV und Netzgeräten der Wirkungsgrad um bis zu 10 % verbessert werden. In den bisherigen DC-

betriebenen Rechenzentren wird häufig ein symmetrisches  $\pm 190\text{ V DC}$ -Netz verwendet. Mit dem Standard ETSI 300132 3 1 v2.1.13 (1) (2011) wurden die Spannungen und die möglichen Erdungssysteme für Rechenzentren bereits beschrieben [12].

Zurzeit läuft in der Open Compute Project Foundation [31] ein Projekt zur Energieversorgung großer Rechenzentren mit Gleichstrom – von der Mittelspannungs-Einspeisung bis zu den Rechenschränken. Dort wird eine Verteilung mit  $800\text{ V DC}$  angestrebt.



**Bild 5.5 – Vergleich AC und DC-Versorgung von Rechenzentren [12]**

## 5.5 Ladeparks für die Elektromobilität

Mit zunehmender Anzahl an Elektrofahrzeugen steigt auch der Bedarf an Ladesäulen. Speziell an Autobahnen und anderen Verkehrsknotenpunkten werden immer größere Ladeparks errichtet. Dabei steigt die Anschlussleistung und die Anzahl der notwendigen DC-Schnellladepunkte in diesen Ladeparks stetig an. Erste Ladeparks mit hunderten DC gekoppelten Schnellladesäulen sind bereits in Betrieb. Große PV-Anlagen und Batteriespeicher können in das Gleichstromnetz integriert werden, um die hohen Lastspitzen auszugleichen. Dort wird eine Spannung von bis zu  $1\,000\text{ V DC}$  verwendet, um die notwendigen Ladeleistungen mit geringen Wandlungs- und Leitungsverlusten im Ladepark bereitzustellen, siehe IEC 61851-23. Künftig ist die Verwendung höherer Spannungen zu erwarten.

## 6 Merkmale der Stromversorgung

Die Spannungsqualität für Gleichspannungsverteilnetze und Gleichspannungsnetze, also der Wechselanteil der Gleichspannung, wird z. B. im technischen Bericht IEC/TR 63282 Ed.2 [4] beschrieben.

Erfolgt die Speisung eines Gleichspannungsnetzes durch einen steuerbaren Wandler (Active Infeed Converter (AIC)) so kann sowohl die Gleichspannung als auch der Strom, der in das Gleichspannungsnetz abgegeben wird, gestellt werden. Sind mehrere Gleichspannungsquellen in einem Netz vorhanden, kann durch eine sogenannte „Droop-Control“ – also eine Strom-Spannungskennlinie, die abhängig von der Spannung im DC-Netz den Strom einstellt – die Regelung der Leistungsflüsse im Netz erfolgen, siehe Abschnitt 12.1.

Auch ist, je nach Anwendungsgebiet, zu unterscheiden, ob eine geregelte oder eine unregelte Ausgangsspannung vorhanden ist. Die Quellen und Konverter der Gleichspannungsnetze können hinsichtlich ihrer Funktion für einen unidirektionalen oder für bidirektionalen Leistungsfluss ausgelegt sein.

Ein Gleichspannungsnetz kann gleichzeitig durch mehrere Stromquellen unterschiedlicher Art gespeist werden. Dazu zählen auch Speichersysteme und Rückspeisungen von Verbrauchern, z. B. Bremsenergie motorischer Antriebe.

Für die Auslegung der Schutzmaßnahmen sind u. a. auch die Kurzschlussleistungen der einzelnen Quellen zu berücksichtigen. Insbesondere dann, wenn ein Inselbetrieb vorgesehen ist. Übliche lokale Quellen, wie PV-Anlagen und auch DC/DC-Wandler können gegenüber einer gewöhnlichen öffentlichen AC-Versorgung geringere Kurzschlussleistungen haben.

## 7 Erdung

### 7.1 Definitionen der Netzsysteme

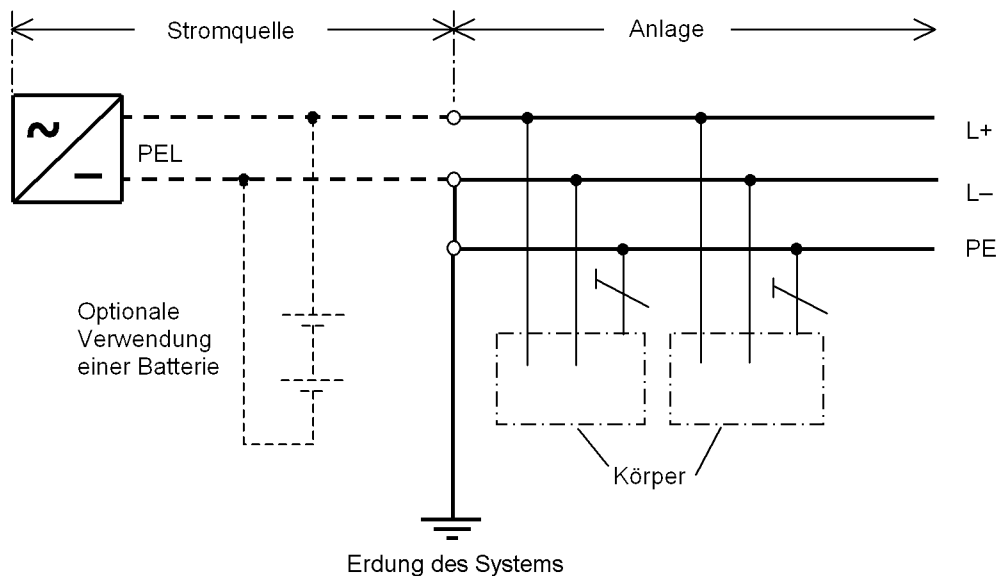
Anerkannte und etablierte Erdungssysteme für AC- und DC-Netze sind in DIN VDE 0100-100 (IEC 60364-1) dokumentiert. Diese sind:

- IT-Systeme
- TN-Systeme
- TT-Systeme

TT-Systeme sollten aufgrund der zwei getrennten, unterschiedlichen Erdungsstellen nicht in Gleichstromnetzen eingesetzt werden; die Erdungsströme zwischen den beiden Systemen können zu Korrosion in Metallstrukturen führen, siehe auch Abschnitt 7.4. Daher werden nur TN- und IT-Systeme empfohlen. Von Deutschland wurde beantragt, dass TT-Systeme für DC nicht angewendet werden dürfen.

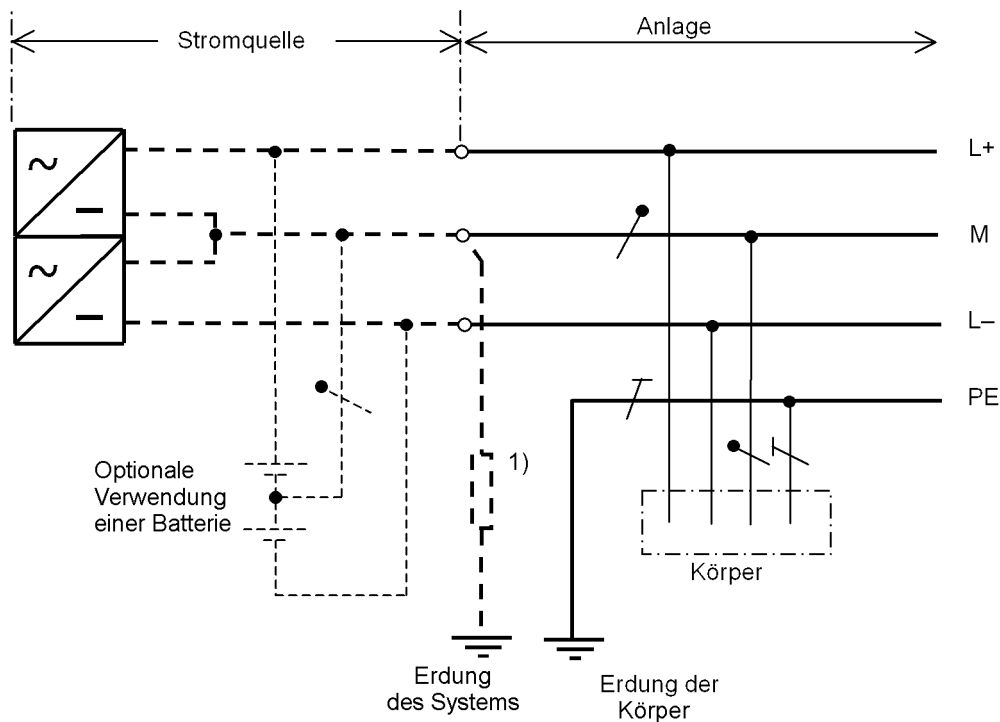
Bei TN-Systemen wird empfohlen, den Schutzleiter separat zu führen. Aus diesem Grund sollte bei einer Neuplanung kein TN-C-Netzsystem berücksichtigt werden.

DC-Netze können mit oder ohne Mittelpunktleiter (M) ausgeführt werden. Wenn ein Mittelpunktleiter verwendet wird, dann darf ausschließlich der Mittelpunktleiter geerdet werden.



**Bild 7.1 – Unsymmetrisches TN-S-DC-System ohne Mittelpunktleiter**





**Bild 7.4 – IT-DC-System mit Mittelpunktleiter**

Sofern in einem geerdeten elektrischen System mehrere Quellen verwendet werden, sollten die nachfolgenden Aspekte beachtet werden:

- Eine direkte Erdung jeder einzelnen Stromquelle ist nach DIN VDE 0100-100 zurzeit nicht vorgesehen. Die Erdung der elektrischen Anlage und die Zusammenführung der „Referenzpunkte“, z. B. der Mittelpunkte, der Stromquellen sollte an einer zentralen Stelle erfolgen, z. B. in der Hauptverteilung. In Bild 7.1 bis Bild 7.4 wird dieser Punkt auch als „Erdung des Systems“ bezeichnet. Die Erdungsanschlüsse der Körper der Stromquellen – sofern vorhanden – müssen einzeln (sternförmig) mit dem Hauptpotentialausgleich verbunden werden.
- In Bild 7.2 ist ein TN-S-DC-Netzsystem mit Mittelleiter und zwei Stromquellen beispielhaft dargestellt. Der Mittelleiter, der von den einzelnen Quellen bis zum zentralen Erdungspunkt bzw. bis zur Aufteilung in M- und PE-Leiter geführt wird, wird als PEM bezeichnet, der in diesem Bereich isoliert gegen Erde auszuführen ist. Es dürfen keine elektrischen Verbrauchsmittel direkt mit diesem Leiter verbunden werden.
- Zusätzliche Erdung des PE in der Anlage darf vorgesehen werden.
- Es wird empfohlen, einen zentralen Erdungspunkt zu projektieren, auch wenn ein DC-System zunächst mit nur einer einzelnen Stromquelle geplant ist, sodass eine nachträgliche Integration von weiteren Stromquellen nach den o. g. Kriterien möglich ist, um Korrosionseffekte zu vermeiden, siehe Abschnitt 7.4.

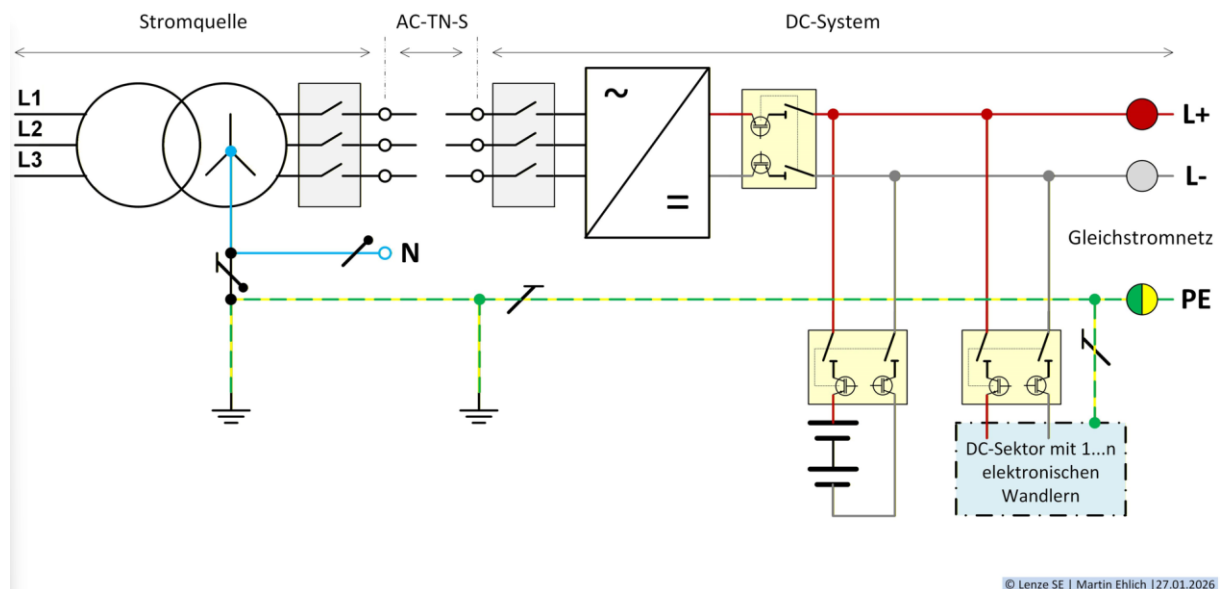
## 7.2 Erdung über das AC-Netz

Ergänzend zu den in der DIN VDE 0100-100 dargestellten DC-Netzsystemen wird im Folgenden ein DC-Netz mit AC-seitiger Erdung auf Basis des Systemkonzepts von DC-INDUSTRIE beschrieben [11]. Dieses System ähnelt dem TN-S-DC-System.

Diese Erdungsart wird als „DC-System mit AC-seitiger Erdung“ bezeichnet. Der Erdungsbezug wird über die Sternpunkt-Erdung am Transformator des AC-Netzes realisiert. Erdungen von L+ oder L- sind im DC-Netz nicht erlaubt. Die Betriebserdung findet zentral am Transformator statt wie in Bild 7.5 gezeigt. Sind mehrere speisende Transformatoren vorhanden, so sind die Sternpunkte niederohmig miteinander zu verbinden und gemeinsam zu erden, damit sich keine signifikanten Potenzialdifferenzen zwischen den Erdern einstellen (um Korrosion über DC-Streuströme zu verhindern, siehe Abschnitt 7.4).

Bei dieser Netzform soll der Neutralleiter der AC-Seite nicht als Mittelpunktleiter des DC-Systems verwendet werden, da andernfalls ein Gleichstrom im N-Leiter des AC-Netzes erzeugt würde [11].

Es sind nur Versorgungsgeräte (AC/DC-Wandler) zulässig, die keine pulsfrequente Gleichtakt-Spannung im DC-Netz erzeugen (Grenzwerte siehe Abschnitt 10.2 in [11]). Im einfachsten Fall sind es ungesteuerte Dioden-Gleichrichter; es können aber auch aktive, gepulste Wechselrichter sein, wenn diese mit einem entsprechenden Gleichtaktfilter ausgestattet sind. Die Versorgungsgeräte müssen gewährleisten, dass die Potentiale der aktiven DC-Leiter (L+ und L-) symmetrisch zu PE sind. Schematisch ist diese Erdungsart in Bild 7.5 zu sehen.



**Bild 7.5 – AC-seitig geerdetes DC-Netz**

Wie in TN-S-Systemen mit Mittelpunkt üblich, müssen als Schutz bei einem Erdschluss Schutzorgane in beiden aktiven Leitern angeordnet werden; in Bild 7.5 sind hierfür symbolisch Leistungstransistoren (IGBT) eingezeichnet. Die Schutzschalter müssen bezüglich ihrer Auslösecharakteristik so bemessen sein, dass sie bei einem Erdschluss das Versorgungsgerät vor Zerstörung<sup>4</sup> schützen. Weiterhin muss sichergestellt sein, dass das Versorgungsgerät auch den notwendigen Kurzschlussstrom liefern kann, um den Schutzschalter auszulösen. Wenn das Versorgungsgerät nicht in der Lage ist, genügend Kurzschlussstrom zu liefern, kann hierfür zur Erhöhung auch ein zusätzlicher Hilfsgleichrichter verwendet werden.

### 7.3 Wechsel in den Inselbetrieb

Bei Gleichstromnetzen, die auch als Inselnetze verwendet werden sollen, kann es erforderlich sein, die Erdungsanordnung während des Inselbetriebs zu ändern (analog zu DIN VDE 0100-802 (IEC 60364-8-82) und VDE-AR-E 2510-2:2021-02, Abschnitt 6.410).

Die Umschaltung vom netzgekoppelten Modus in den Inselmodus und umgekehrt kann durch den Betrieb des Schaltgeräts für den Inselbetrieb (analog zu DIN VDE 0100-802 (IEC 60364-8-82), Abschnitt 82.6.3.4) erreicht werden.

Die einfache Integration von Speichern ist ein großer Vorteil von DC-Netzen. Insbesondere bei Ausfall des vorgelagerten AC-Netzes oder auch bei Fehlerfällen im DC-Netz kann entweder das ganze DC-Netz oder ein Teil davon aus Speichern weiterbetrieben werden. Dabei ist zu beachten:

- Bei der Erdungsart „Erdung über das AC-Netz“ (Abschnitt 7.2) geht bei Ausfall des AC-Netzes der Bezug der aktiven Leiter zu Erde verloren. Es entsteht ein IT-DC-System ohne Mittelpunktleiter.
- Bei der „DC-Mittelpunkterdung“ (Bild 7.2) kann sich durch Abtrennen aller DC-Sektoren, in denen eine niederohmige Verbindung der aktiven Leiter zu Erde besteht, die Netzform ändern.
- Bei der Erdungsart „DC-IT“ (Bild 7.3) kann die Symmetrierungseinrichtung abgetrennt werden (hier keine Änderung der Netzform). Dadurch kann die Symmetrie der Spannungen zu Erde verloren gehen.

<sup>4</sup> Hinweis: die  $i^2t$ -Werte von Schutzschalter und Versorgungsgerät müssen aufeinander abgestimmt sein.

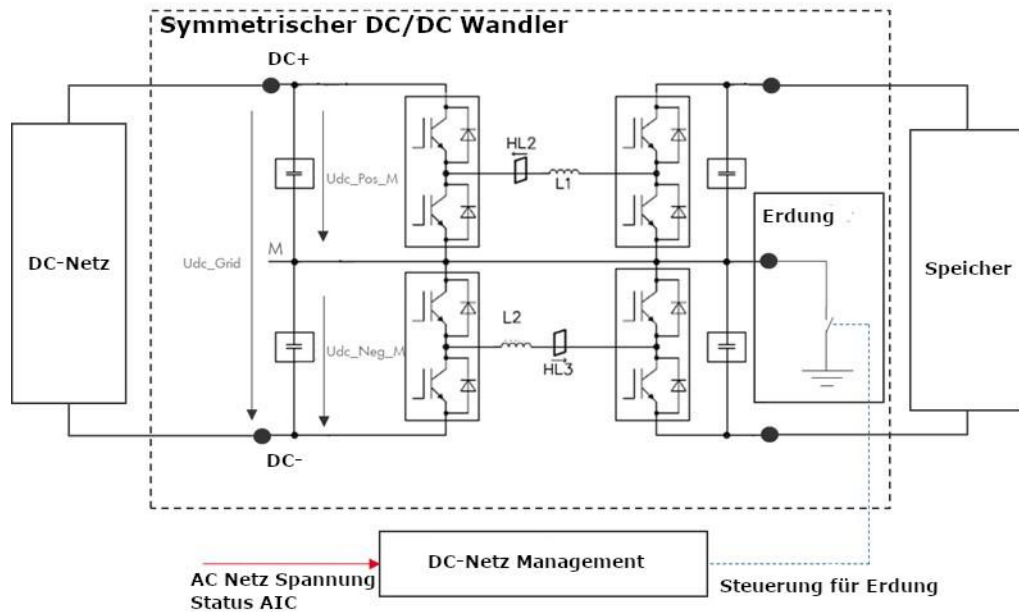
Beim DC-Inselnetz kann wie folgt verfahren werden:

- Wenn durch Verlust der Erdverbindung (Inselnetzbildung) ein IT-System entsteht und die Symmetrie zu PE verloren geht, kann es zu einer Überlastung der Kriechstrecke kommen. Ein Weiterbetrieb als IT-Netz ohne Erdfehlerüberwachung sollte daher 10 s nicht überschreiten. In dieser Zeit ist eine Überlastung der isolierenden Kriechstrecken unwahrscheinlich [14].
- Ein Weiterbetrieb als DC-IT Netz nach Bild 7.3 ist möglich. Dafür ist es wichtig, dass die Isolationswiderstände bereits vor der Umschaltung symmetrisch sind. Für eine Beurteilung des Isolationswiderstandes auch bei harter Erdung können Differenzstromsensoren<sup>5</sup> eingesetzt werden. Wenn auf der DC-Seite des AC-seitig geerdeten DC-Netzes ein IMD zum Einsatz kommt, um die Symmetrierung und Isolationsüberwachung bei Wegfall der Haupteinspeisung zu übernehmen, ist darauf zu achten, dass der IMD-Alarm im Normalbetrieb mit vorhandener Haupteinspeisung deaktiviert ist.
- Ein Weiterbetrieb als temporär mittelpunktgeerdetes DC-Netz.
  - Durch Zuschalten einer Mittelpunktnachbildung wird für den Inselbetrieb temporär eine Erdung nach Bild 7.2 erzeugt (analog zu AC, siehe VDE-AR-E 2510-2).
  - Folgende Anforderungen werden an die Mittelpunktnachbildung gestellt:
    - Die Mittelpunktnachbildung darf nur aktiv sein, wenn andere Erdungseinrichtungen abgetrennt sind.
    - Die Mittelpunktnachbildung muss niederohmig (mind. 10 mm<sup>2</sup>, Spannungsfall  $\leq 0,2$  V) mit der Potentialausgleichsschiene verbunden sein.
    - Die Mittelpunktnachbildung darf nur direkt im Speichersystem oder einem entsprechendem AIC ausgeführt sein.
    - Im Fehlerfall muss sichergestellt sein, dass das Speichersystem in Kombination mit der Mittelpunktnachbildung den notwendigen Kurzschlussstrom liefern kann, um alle in diesem Betriebszustand relevanten Schutzorgane auslösen zu können.
    - Die Erdverbindung ist während des Inselbetriebs zu überwachen. Versagt die Mittelpunktnachbildung, so muss das DC-Netz abgeschaltet werden.
    - Die Umschaltung der Erdverbindung muss innerhalb von 100 ms erfolgen.
  - Ausführungsbeispiel 1: Temporäre Mittelpunkterdung über Speicher-Converter:

Technisch ist dies insbesondere bei „symmetrisch“ aufgebauten DC/DC-Wandlern zur Speicheranbindung vorteilhaft. Die Realisierung der Symmetrie des Converters erfolgt zwischen DC+ und DC-, sodass sich zwischen der Sekundärseite und der Primärseite ein durchgängiges M-Potential bilden lässt. Fällt das AC-Netz aus, so wird dies durch das Netzmanagement erkannt, welches die Mittelpunkterdung des Speicherconverters über den „Grounder“ in Bild 7.6 aktiviert.

---

<sup>5</sup> Symmetrische Erdfehler können mit Differenzstromsensoren nicht erkannt werden.



**Bild 7.6 – Funktionsprinzip einer temporären Mittelpunkterdung an einem symmetrischen DC/DC Wandler in einem DC-Netz [11]**

- Ausführungsbeispiel 2: Temporäre Mittelpunkterdung über AIC

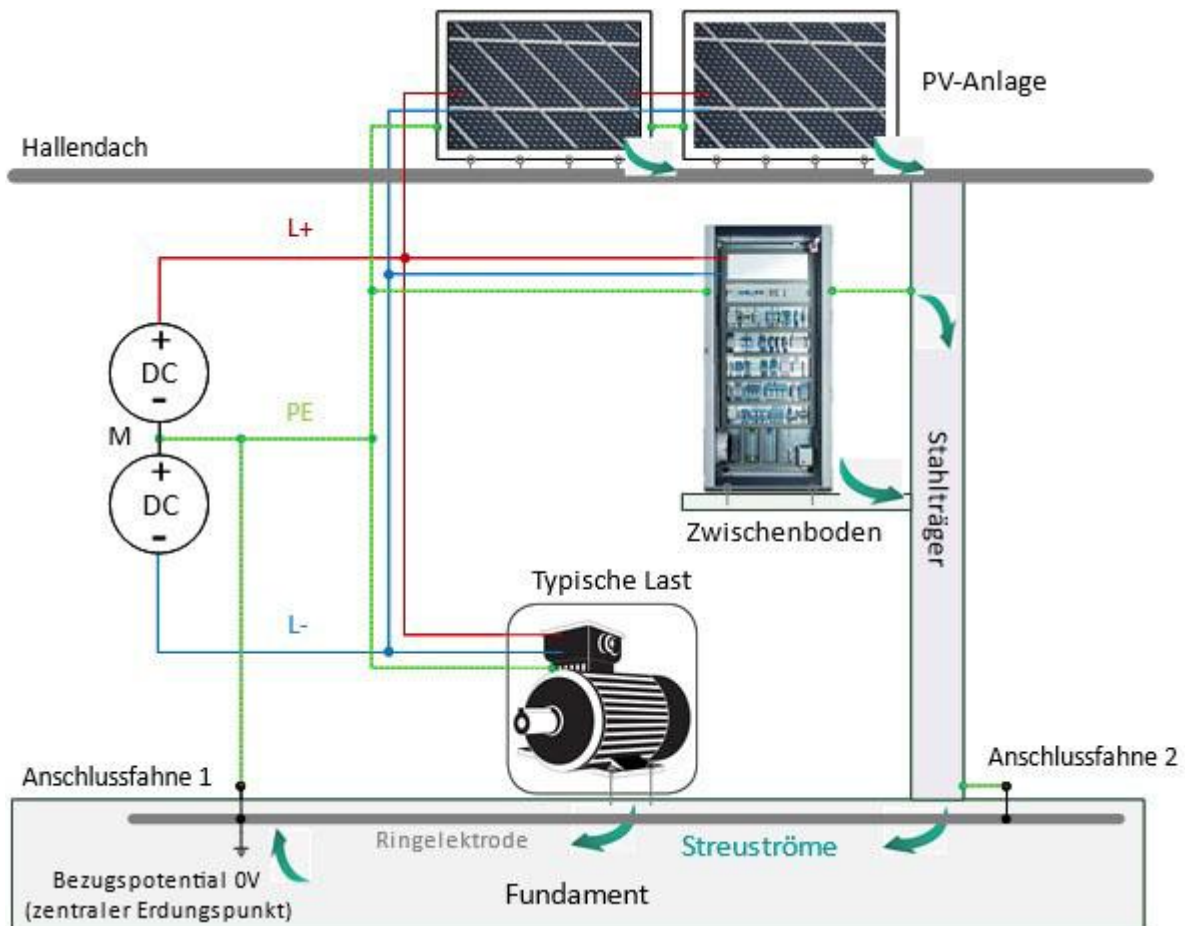
Eine weitere Möglichkeit der temporären Erdung bieten 4-Leiter Multi-Level-AICs. Hier wird der N-Leiter des AC-Netzes bei AC-Netzausfall temporär mit dem Mittelpunkt des Zwischenkreises des AIC verbunden. Obwohl das AIC bei einem Ausfall des AC-Netzes vom AC-Netz getrennt wird, bleibt die DC-Seite des AICs weiterhin mit dem DC-Netz verbunden. Dadurch wird das N-Potential des sternpunktartig geerdeten Trafos mit der „Potential-Mitte“ des DC-Netzes verbunden. Die Netzform (TN-Netz) im DC-Netz bleibt auch hier trotz AC-Netzausfall erhalten.

## 7.4 DC-Korrosionseffekte bei Mehrfacherdung

### 7.4.1 Allgemeines

Streustromkorrosion findet an Stellen statt, bei denen ein parasitärer DC-Strom (sogenannter Streustrom) von Metall in ein elektrolytisches Medium (typischerweise Beton/Erde) übertritt<sup>6</sup>. Elektrochemisch wird dieser Prozess als anodische Teilreaktion bezeichnet. Damit DC-Streustromkorrosion entstehen kann, muss eine materialabhängige Mindest-Potentialdifferenz überschritten werden. Die DIN EN 50162 nennt hierfür den Schwellwert **200 mV** für die Materialkombination Stahl in Beton [13]. Bild 7.7 zeigt mögliche Pfade für den Streustrom.

<sup>6</sup> Streustromkorrosion ist ein DC-spezifisches Problem, da bei AC durch das periodische Ändern der Stromrichtung kein Materialabtrag stattfindet. Die Streustromkorrosion ist seit langer Zeit bei DC-betriebenen Bahnen, aber auch bei ausgedehnten PV-Anlagen bekannt.



**Bild 7.7 – Schematische Darstellung von Streuströmen bei hart geerdetem DC-Netz [11]**

Bei einem Stromfluss von 1 A für ein Jahr berechnet sich der Materialabtrag für Eisen in einem Elektrolyten mit den Faraday'schen Gesetze zu 9,13 kg. Zu beachten ist hierbei, dass nur der elektrolytisch fließende Strom, z. B. im Beton, zu einem Materialabtrag führt, nicht der Strom, der z. B. in einem metallischen Ringerder fließt. Innerhalb metallischer Leiter findet durch Stromfluss keine stoffliche Änderung statt.

Ob ein kontinuierlich z. B. im Beton fließender DC-Streustrom über die Nutzungszeit von Produktionsgebäuden einen kritischen Einfluss auf die Gebäudestruktur hat, ist nicht nur abhängig von der Höhe des Streustroms, sondern auch abhängig von der Verteilung auf mehrere Übertrittsstellen Metall zu Beton. Als Erfahrungswert aus der Bahntechnik wird ein elektrolytisch fließender DC-Streustrom  $\leq 10$  mA je Übergangsstelle Erder-Elektrolyt als unkritisch betrachtet [29].

In DC-INDUSTRIE wurden vier verschiedene Streustrompfade und deren Wirkungsmechanismen betrachtet, welche in den nächsten Unterkapiteln beschrieben werden [11].

#### **7.4.2 Direkt von einem aktiven Leiter in ein elektrolytisches Medium fließender Streustrom**

Ein Beispiel hierfür wäre eine PV-Anlage auf einer Produktionshalle, deren DC-PV-Kabel direkt auf dem Betondach der Produktionshalle verlegt wurden.

Entsteht hier z. B. an einem beschädigten DC-PV-Kabel ein unbemerkter Isolationsfehler und besteht zwischen den aktiven Leitern der PV-Anlage und dem Erdungssystem der Produktionshalle eine galvanische Verbindung, dann ist der sich ergebene Fehlerstrom gleichzeitig auch ein elektrolytisch fließender Streustrom. Dieser elektrolytisch fließende Streustrom wird nur begrenzt durch die elektrische Leitfähigkeit des Betondachs und den verbleibenden Isolationswiderstandswert des defekten Kabels.

Dauerhaft fließende DC-Streuströme von bis zu 300 mA werden bei geerdet betriebenen PV-Anlagen generell toleriert und führen nicht zur Abschaltung der PV-Anlage (siehe IEC 63112).

Fließende Ströme in dieser Größenordnung durch das Betondach konzentriert in metallische, geerdete, tragende Elemente (Stahlträger) so sind über die Nutzungszeit des Gebäudes an den Übergangsstellen Beton/Stahl nicht zu vernachlässigende Korrosionseffekte zu erwarten.

#### **Mögliche Gegenmaßnahmen:**

- Galvanische Trennung der PV-Anlage und Einsatz einer Isolationsüberwachung, siehe IEC 63112, Tabelle 1 und Abschnitt 5.2.
- Bei geerdetem DC-Netz und Anbindung der PV-Anlage über einen nicht-isolierenden DC/DC-Wandler:
- Keine direkte Verlegung von PV-Kabeln auf einem elektrolytischen Medium (Betondach, Erdboden).
- Verlegung von PV-Kabeln in schutzgeerdeten, metallischen Kabelkanälen.
- Überprüfung des Isolationswiderstandes täglich bei Inbetriebnahme der Anlage<sup>7</sup>

#### **7.4.3 Parallel zum Ringerder im Fundament elektrolytisch fließender Streustrom**

Typische Industriehallen sind mit einem Ringerder ausgestattet, der über mehrere Anschlusspunkte verfügt. Fließt nun ein Streustrom über einen Anschluss und den Ringerder zum zentralen Erdungspunkt ZEP, so verursacht der Anteil durch den Ringerder keine Korrosion. Da sich der Ringerder aber in elektrolytischem Medium befindet, kann sich parallel zum Ringerder ein paralleler Strompfad ausbilden, wodurch Korrosion entstehen kann.

Der Widerstandswert von einem Anschlusspunkt des Ringerders zu jedem anderen Anschlusspunkt an den Fundamentenderdarf 1  $\Omega$  nicht überschreiten (Abschnitt 8 der DIN 18014:2023). Ein möglichst niedriger Widerstand erleichtert aber die Erkennung solcher Erdströme.

#### **Mögliche Gegenmaßnahmen:**

- Wahl der Erdungsform DC-IT und Einsatz einer permanenten Isolationsüberwachung. So müssten zum Beispiel bei 800 V Isolationswiderstandswerte  $< 1600 \Omega$  (für 0,5 A) bzw. sogar  $< 800 \Omega$  (bei 1 A) auftreten. Diese Isolationswiderstände sind deutlich niedriger als die, die für IT-Systeme als Minimalwert gefordert (100  $\Omega/V$ ) sind. Somit würde die Isolationsüberwachung diesen Fehler erkennen.
- Bei geerdeten Netzformen: Vorsehen einer permanenten Differenzstromüberwachung an kritischen DC-Sektoren, d. h. Sektoren, die geeignet sind, so hohe DC-Fehlerströme unbemerkt zu treiben.
- Stromfluss über Ringerder vermeiden durch Verbindung aller Körper mit dem Schutzleitersystem, welches gegenüber dem Erdpotential isoliert verlegt wird und direkt mit dem ZEP verbunden ist.

#### **7.4.4 Parasitär, elektrolytisch fließende Streuströme an schutzgeerdeten Betriebsmitteln**

Bei Betriebsmitteln der Schutzklasse SK I fließt der überwiegende Teil des DC-Fehlerstroms bei einem Isolationsfehler über den Schutzleiter zum zentralen Erdungspunkt. Viele dieser Betriebsmittel haben jedoch direkten elektrisch leitenden Kontakt zu einem elektrolytischen Medium. Beispielsweise werden schutzgeerdete Robotergehäuse direkt im Fundament verschraubt.

Bei Messungen in DC-Industrie-Testanlagen wurden parasitäre Erdwiderstände zwischen Betriebsmitteln der Schutzklasse SK I und dem zentralen Erdungspunkt im Bereich von 5 k $\Omega$  – 7 k $\Omega$  ermittelt. Der Stromteiler des metallisch fließenden Schutzleiterstroms zu dem parasitär fließenden elektrolytischen Streustrom wurde zu ca. 10 000 zu 1 ermittelt<sup>8</sup>. Um den oben aus der Bahntechnik genannten elektrolytischen DC-Streustrom-Wert von 10 mA zu überschreiten, müssten in diesem Fall über lange Zeit unbemerkt DC-Fehlerströme von ca. 100 A fließen, was eher unwahrscheinlich ist.

<sup>7</sup> Nach DIN EN IEC 63112:2021-05 Abschnitt 5.2.

<sup>8</sup> Für die Bestimmung des Stromteilers wurde zwischen dem Betriebsmittel der Anlage und dem zentralen Erdungspunkt ein Strom von 10 A eingeprägt. Der elektrolytische Streustrom wurde mit einer Stromzange ermittelt, in die sowohl ein Leiter der 10 A-Stromquelle als auch der PE-Leiter des Betriebsmittels eingelegt war (Leckstrommessung).

Kritischer wären Stromteiler an Betriebsmitteln in einer Größenordnung von z. B. 1 000 zu 1 oder noch kleiner. Denkbar ist ein solcher niedriger Erdungswiderstand mit kleinem Stromteilverhältnis, z. B. wenn eine Befestigungsschraube eines SK-I-Betriebsmittels direkt leitfähigen Kontakt mit einer ungeerdeten Stahlmatte im Beton bekommt oder wenn ein Fundament feucht wird.

#### Mögliche Gegenmaßnahmen:

- Wahl der Erdungsform DC-IT-System und Einsatz einer permanenten Isolationsüberwachung. Bei einem isolationsüberwachten DC-IT-System sind unbemerkte DC-Fehlerströme in der Größenordnung einiger Ampere auszuschließen.
- Bei geerdeten Netzformen:
- Initiale und eventuell zyklische Bestimmung von parasitären Erdwiderständen an Betriebsmitteln der Schutzklasse SK I mit direktem leitfähigem Kontakt zu einem elektrolytischen Medium, und daraus abgeleitet Ermittlung des Stromteilers metallische Stromleitung zu elektrolytischer Stromleitung.
- Vorsehen einer permanenten Differenzstromüberwachung an kritischen DC-Sektoren, d. h. Sektoren, die geeignet sind, so hohe DC-Fehlerströme unbemerkt zu treiben.

#### 7.4.5 Parasitär, elektrolytisch fließende Streuströme von benachbarten Anlagen (HGÜ, PV-Felder)

Verlaufen in der Nähe von Produktionsanlagen HGÜ Leitungen oder sind in der Nähe große, fremdbetriebene PV-Felder so könnten unabhängig vom Erdungskonzept und von der Art der Stromversorgung (DC, 3~AC) durch Streustromeinkopplung aus diesen Systemen auch nicht zu vernachlässigende Korrosionseffekte entstehen.

Da dies keine spezifischen Probleme von DC-Anlagen sind, wurden im Rahmen des Projekts „DC-Industrie“ diesbezüglich keine näheren Untersuchungen durchgeführt.

In diesen Fällen können allgemeine Korrosions-Schutzmaßnahmen, wie z. B. die Installation von Opferanoden, zur Anwendung kommen. Diese Schutzmaßnahmen sind auch in der DIN EN 50162 beschrieben.

## 8 Schutzmaßnahmen

### 8.1 Allgemeines

*Zitat aus der DIN VDE 0100-100:*

*Die in 131.2 bis 131.7 enthaltenen Anforderungen sind dazu bestimmt, die Sicherheit von Personen, Nutztieren und Sachwerten hinsichtlich der Gefahren und Schäden sicherzustellen, die bei bestimmungsgemäßem Gebrauch elektrischer Anlagen entstehen können. Die Anforderungen für die Sicherheit von Nutztieren sind in den für die Nutztiere bestimmten Räumlichkeiten anzuwenden.*

Diese Anforderungen gelten auch für DC-Anlagen bis 1 500 V. Die Merkmale der Stromversorgung, die in Abschnitt 6 beschrieben sind, sind bei der Auswahl der geeigneten Schutzmaßnahmen von Bedeutung; besonders relevant ist hier die unterschiedliche Charakteristik der Quellen im Gleichstromnetz, insbesondere bei der Kurzschlussleistung.

Auch Gleichspannungsnetze werden genauso wie AC-Systeme nach Art der Erdverbindung, siehe Abschnitt 7.1, unterscheiden.

Aus den bestehenden Statistiken, wie z. B. [28] geht hervor, dass die Häufigkeit von DC-Unfällen aufgrund der beschränkten Einsatzgebiete geringer als bei AC ist. Allerdings zeigt die Entwicklung in den letzten Jahren, dass Gleichspannungsanwendungen mittlerweile den gesamten Bereich der Niederspannung ausnutzen. Durch PV-Anlagen oder Batteriespeicher, wie sie u. a. in der Elektromobilität Anwendung finden, existieren bereits viele elektrische Anlagen mit Gleichstromtechnik, in dem dort als Hochvolt bezeichneten Spannungsbereich.

Fragestellung in diesem Kontext werden im Rahmen von Forschungsprojekten derzeit untersucht (siehe Anhang A).

## 8.2 Schutz gegen elektrischen Schlag

### 8.2.1 Allgemein

*Zitat aus DIN VDE 0100-100, Abschnitt 131.2.2 [2]:*  
*Personen und Nutztiere müssen vor Gefahren geschützt werden, die beim Berühren von Körpern elektrischer Betriebsmittel im Falle eines Fehlers entstehen.*  
*Dieser Schutz kann durch die Anwendung einer der folgenden Methoden erreicht werden:*  
*Verhindern, dass ein Fehlerstrom durch eine Person oder ein Nutztier fließt; [2]:*  
*Begrenzung der Größe des Fehlerstroms, der durch eine Person oder ein Nutztier fließt, auf einen ungefährlichen Wert; Begrenzung der Dauer des Fehlerstroms, der durch eine Person oder ein Nutztier fließen kann, auf eine ungefährliche Dauer.*

Die folgenden Abschnitte beschreiben Herausforderungen bei der Festlegung von Maßnahmen zur Vermeidung einer Personengefährdung durch elektrischen Schlag in DC-Installationen.

Dies erfordert eine detaillierte Analyse von physiologischen Schwellwerten, Quellverhalten im Fehlerfall etc., um daraus Anforderungen an Schutzmaßnahmen in DC-Niederspannungsinstallationen insbesondere an Abschaltzeiten zu stellen.

Bei den normativen Grundlagen im Hinblick auf DC-Schutzmaßnahmen wird unterschieden zwischen:

- Grundlegenden Sicherheitsvorschriften, siehe Abschnitt 8.2.2
- Errichtungsbestimmungen, siehe Abschnitt 8.2.3

Im Anhang A werden aktuelle Forschungsaktivitäten aufgezeigt, die Einfluss auf die o. g. Normen haben könnten.

### 8.2.2 Grundlegende Sicherheitsvorschriften (Basic Safety Publications)

Die Anforderungen sind in den Dokumenten der Reihe IEC 60479 (Effects of current on human beings and live-stock) und DIN EN 61140 (VDE 0140-1) bzw. IEC 61140 (Protection against electric shock – Common aspects for installation and equipment) beschrieben.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen AC und DC in Bezug auf den elektrischen Schlag sind:

- Bei DC ist die zulässige **Berührspannung** bei einem einzelnen Fehler mit 60 V höher als die 25 V für AC (Werte jeweils für trockene Umgebung, Abschnitt 5.2.6 der DIN EN 61140 (VDE 0140-1) bzw. IEC 61140).
- Für den **Strom** sind die Grenzwerte des Berührungstroms bei DC mit 25 mA höher als bei AC (5 mA), jeweils für Klasse 2 ohne gefährliche physiologische Folgen bei Berührung [Fig. 22 für DC und Fig. 20 für AC in IEC 60479-1].

### 8.2.3 Errichtungsbestimmungen

Die DIN VDE 0100-410 (Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 4-41: Schutzmaßnahmen – Schutz gegen elektrischen Schlag) (IEC 60364-4-41) ist die Gruppensicherheitsnorm (GSP) für Schutz gegen elektrischen Schlag von Personen und Nutztieren. Sie basiert auf den Festlegungen der DIN EN 61140 (VDE 0140-1) und überträgt diese für die Errichtung elektrischer Niederspannungsanlagen.

Dabei gilt für DC genauso wie für AC die Grundregel, dass gefährliche aktive Teile nicht berührbar sein dürfen und berührbare leitfähige Teile weder unter normalen Bedingungen noch unter Einzelfehlerbedingungen zu gefährlichen aktiven Teilen werden dürfen.

Hinweis:

Die der DIN VDE 0100-410 zugrunde liegende internationale Norm IEC 60364-4-41 befindet sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt in Bearbeitung. Insbesondere die Anforderungen für DC-Systeme (u.a. Abschaltzeiten für den Schutz durch automatische Abschaltung) können sich mit der kommenden Ausgabe ändern

Besondere Beachtung gilt der Spannungsfreiheit in „Inselfähigen Anlagenteilen“ oder DC-Anlagenteilen, die nicht spannungsfrei geschaltet werden können (PV), bei Arbeiten an der Anlage.

Diese Inselnetzbildung ist auch bei AC-Netzen möglich, wenn diese mit einem Speicher versehen sind (Hinweise dazu siehe VDE-AR-E 2510-2, Abschnitt 6.410 und IEC 60364-8-82, Abschnitt 82.6.3.4).

## 8.3 Schutz gegen thermische Auswirkungen

*Zitat aus DIN VDE 0100-100, Abschnitt 131.3 [2]:*

*Die elektrische Anlage muss so errichtet sein, dass das Risiko einer Gefahr durch Entzündung brennbarer Materialien infolge hoher Temperatur oder eines elektrischen Lichtbogens möglichst klein ist. Zusätzlich darf während des normalen Betriebs der elektrischen Betriebsmittel für Personen und Nutztiere ein Risiko durch Verbrennungen nicht bestehen [2].*

### 8.3.1 Allgemeines zu thermischen Auswirkungen

Nach DIN VDE 0100-420 sind Personen, Nutztiere und Sachen auch vor Schädigung oder Verletzung durch Wärme oder Feuer, die von elektrischen Anlagen verursacht werden oder sich ausbreiten können, zu schützen, in dem die normativen Anforderungen und Hinweise der Betriebsmittelhersteller berücksichtigt werden. Die Wärme, die von elektrischen Betriebsmitteln oder Anlagen erzeugt wird, darf keine Gefahr oder schädliche Auswirkungen auf die unmittelbare oder nähere Umgebung haben. Diese Anforderungen aus der DIN VDE 0100-100 werden im Teil DIN VDE 0100-420 weiter konkretisiert und sind gleichermaßen für AC- und DC-Anwendungen gültig.

Viele der Ursachen, die zu einer unzulässigen Erwärmung und damit verbundener Schädigung oder Entzündung führen können, sind unabhängig von der Spannungsform. Allgemeine Ursachen können nach DIN VDE 0100-420 sein:

- Wärmestau, Wärmestrahlung, heiße Teile,
- Beeinträchtigung der sicheren Funktion elektrischer Betriebsmittel,
- Überstrom,
- Isolationsfehler und/oder Lichtbögen,
- Oberschwingungsströme,
- Überspannungen (siehe DIN VDE 0100-443).

Es gibt jedoch auch Ursachen, deren Auswirkungen bei DC-Anwendungen kritischer zu betrachten sind. Einer der Hauptunterschiede zwischen AC und DC sind die fehlenden Nulldurchgänge bei DC. Dadurch werden Mikrolichtbögen bzw. Lichtbögen oder Fehlerlichtbögen, z. B. entstehend bei Steckvorgängen unter Last, Vibrationen an Verbindungsstellen unter Last bzw. Bewegungen aufgrund Temperaturunterschiede, nicht gelöscht, sondern können elektrische Kontaktflächen und umliegendes Isolationsmaterial derart schädigen, dass in der Folge unzulässige Erwärmungen an diesem Bauteil auftreten. Durch die Verwendung spezieller (Steck-) Verbindungen können diese Auswirkungen verhindert werden.

Für einen Isolationsfehler wird in der Fachliteratur ein Wert von ca. 60 W umgesetzter Leistung an der Fehlerstelle genannt, der bei „üblichen Materialien“ der Isolation eine Brandgefahr darstellt, siehe Abschnitt 3.2 in [5].10 [5].11.

In der aktuellen Normenlandschaft für Niederspannungsinstallationen (DIN VDE 0298-4) wird nicht zwischen der Eignung von Kabeln und Leitungen für die Verwendung bei AC und DC unterschieden. Isolationsmaterialien von Kabeln und Leitungen können – abhängig vom verwendeten Material – hinsichtlich Isolationswiderstand und Durchschlagsfestigkeit unterschiedlich schnell altern, je nachdem ob sie mit Gleich- oder Wechselspannung betrieben werden. Aktuell werden von verschiedenen Instituten Untersuchungen zum Alterungsverhalten bei Belastung mit Gleichspannung durchgeführt, siehe z. B. Paper von Lapp und TU Ilmenau [6]. Diese Forschungsergebnisse zeigen, dass sich viele etablierte Materialien auch für DC eignen. Materialien auf Basis von PE, VPE, PP, TPE E, TPE V können bedenkenlos eingesetzt werden.

## 8.4 Schutz bei Überstrom (DIN VDE 0100-430 (VDE 0100-430))

### 8.4.1 Allgemein

*Zitat aus DIN VDE 0100-100, Abschnitt 131.4.*

*Personen und Nutztiere müssen gegen Verletzungen und Sachwerte gegen Schäden geschützt sein, die infolge zu hoher Temperatur oder elektromechanischer Beanspruchungen, verursacht durch irgendwelche Überströme, die wahrscheinlich in den Kabeln und Leitungen auftreten, entstehen können.  
Der Schutz kann erreicht werden durch Begrenzung des Überstroms auf einen sicheren Wert oder eine Begrenzung der Dauer des Überstroms.*

Grundsätzlich gelten für Gleichspannung die gleichen Sicherheitsregeln wie für Wechselspannung. Das Schalten und Schützen von Gleichspannungen und -strömen ist aus anderen Anwendungsgebieten (Bahntechnik, Hochspannungs-Energieübertragung) bekannt. Hier werden die Besonderheiten für das DC-Netz beschrieben.

Für die Beherrschung von Kurz- oder Erdschlüssen im DC-Netz sind das Erdungskonzept und die Netzform aus Kapitel 7 zu beachten. Es ist sicherzustellen, dass im Fehlerfall der fehlerhafte DC-Sektor sicher von der Anlage getrennt werden kann, ohne andere DC-Sektoren zu beeinträchtigen. Daher ist an jedem Eingang eines DC-Sektors eine Überstromschutzeinrichtung erforderlich, die Kurzschlüsse, Überlast und bei den niederohmigen Erdungsarten auch Erdschlüsse beherrscht.

Im Rahmen des DC-Industrie Projektes wurden folgende zusätzliche Festlegungen formuliert:

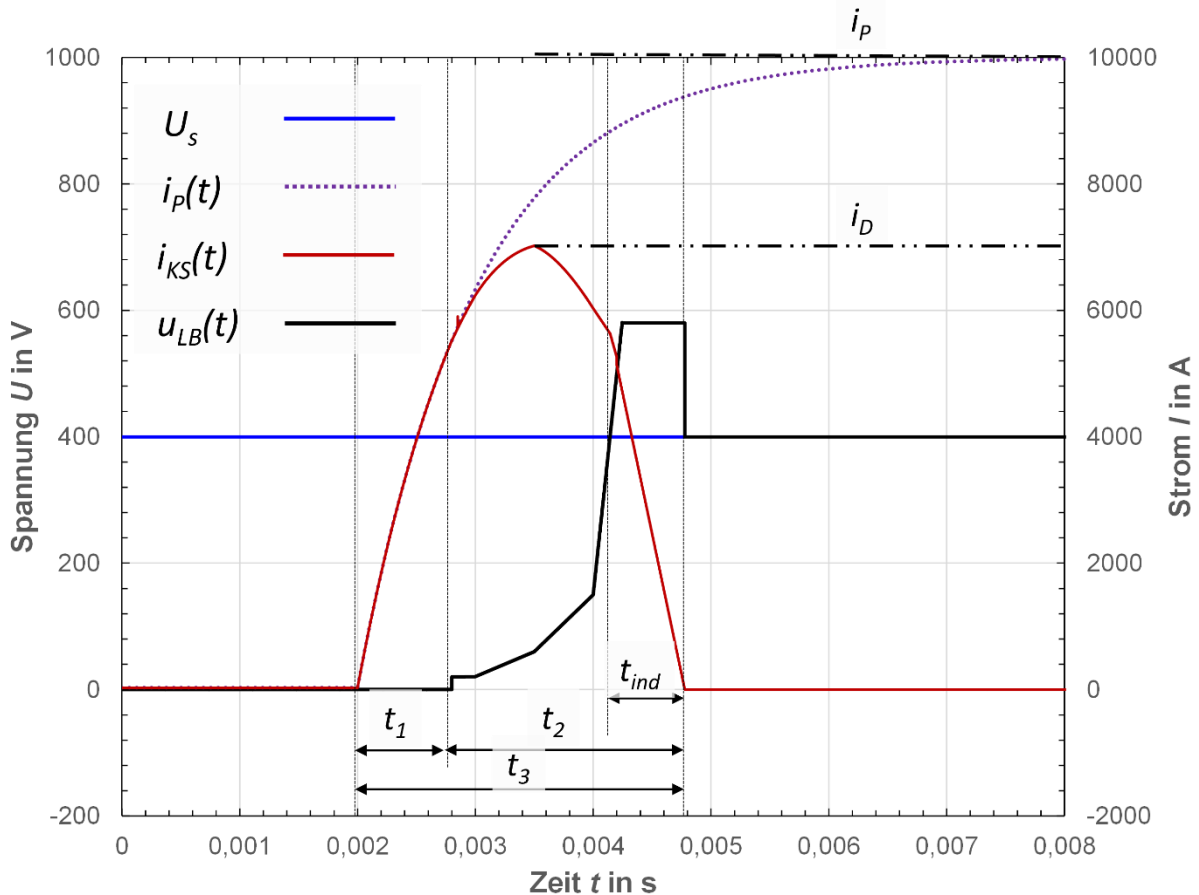
Die Leistungen der jeweiligen DC-Sektoren sollten möglichst gleichmäßig verteilt sein, d. h. es soll keine einzelne dominante Last geben, damit Auswirkungen auf benachbarte Zonen im Fehlerfall vermieden werden. Es ist sicherzustellen, dass während einer Abschaltung die Spannung in den anderen Lastzonen innerhalb der Spannungsbänder und Betriebsstatus bleibt, die in Abschnitt 5 und dort insbesondere in Bild 5.2 und Bild 5.3 beschrieben sind.

### 8.4.2 Kurzschluss

Die Anforderungen an den Schutz bei Kurzschluss sind bei DC im Wesentlichen dieselben wie bei AC. Zu berücksichtigen ist:

1. Da DC-Netze häufig kapazitiv geprägt sind, steigt im Fall eines Kurzschlusses der Fehlerstrom im DC-Netz sehr schnell an –10 A/μs oder größer sind realistisch. Dies muss bei der Auslegung der Kurzschlusschutzeinrichtungen berücksichtigt werden. Neben dem Schutz der Kabel und Leitungen muss auch der Schutz von weiteren stromführenden Betriebsmitteln (insbesondere Halbleiter) und deren Strom Belastbarkeiten (max.  $i^2t$ -Werte) berücksichtigt werden.
2. Speisung durch Quellen mit begrenzter Kurzschlussleistung insbesondere bei geregelten elektronischen Wandlern (auch Active Infeed Controller genannt). Hierbei sind die Schutzorgane auf den geringeren unbeeinflussten Kurzschlussstrom abzustimmen. Beispielsweise können PV-Zellen im Kurzschlussfall typischerweise nur einen geringfügig höheren Strom als ihren Nennstrom liefern.
3. Erfolgt die Speisung eines Gleichspannungsnetzes durch ungesteuerte Gleichrichter so kann der im Kurzschlussfall auftretende Kurzschlussstrom nicht aktiv begrenzt werden, sondern ergibt sich aus Quellenspannung und -impedanz und dem Schleifenwiderstand.
4. An ausgedehnte DC-Netze, insbesondere in der Industrie, sind oft mehrere Quellen, wie PV-Anlagen, Batteriespeicher oder auch Kapazitäten, angeschlossen. Diese speisen im Fehlerfall gemeinsam den Kurzschlussstrom. Hierbei sind die Anforderungen an eine selektive Abschaltung nur der Fehlerstelle höher als bei einer linienförmigen Infrastruktur. Für selektive Abschaltung ist dort z. B. die Erkennung der Stromrichtung in den Schaltgeräten geeignet, damit nur das Schaltgerät an der Fehlerstelle ausschaltet.

Das nachfolgende Bild 8.1 zeigt die zeitlichen Verläufe von Spannungen und Strömen in einem 400 V Gleichstromsystem mit einem Nennstrom von 30 A bei Abschalten durch ein strombegrenzendes elektromechanisches Schaltgerät.



**Bild 8.1 – Kennwerte im Kurzschlussfall**

Kennwerte:

1. Unbeeinflusster oder auch prospektiver Kurzschlussstrom  $i_p$  – Hier mit Scheitelwert 10 kA
2. Durchlassstroms  $i_D$  – Das Eingreifen eines strombegrenzenden Überstromschutzorgans, wie eines Leistungsschalters oder einer Sicherung, begrenzt den Strom auf den Durchlassstrom
3. Auslösezeit  $t_1$  oder auch Schmelzzeit
4. Lichtbogenbrenndauer oder auch Schaltzeit  $t_2$  – Nach der Auslösezeit reagiert das Überstromschutzorgan, begrenzt den Strom und zwingt den Strom zu 0 A
5. Phase des Abbaus induktiver Energie im Lastkreis  $t_{ind}$  als Teil der Schaltzeit  $t_2$
6. Ausschaltzeit  $t_3$  oder englisch „clearing time“ ist die Summe aus Auslösezeit  $t_1$  und Schaltzeit  $t_2$

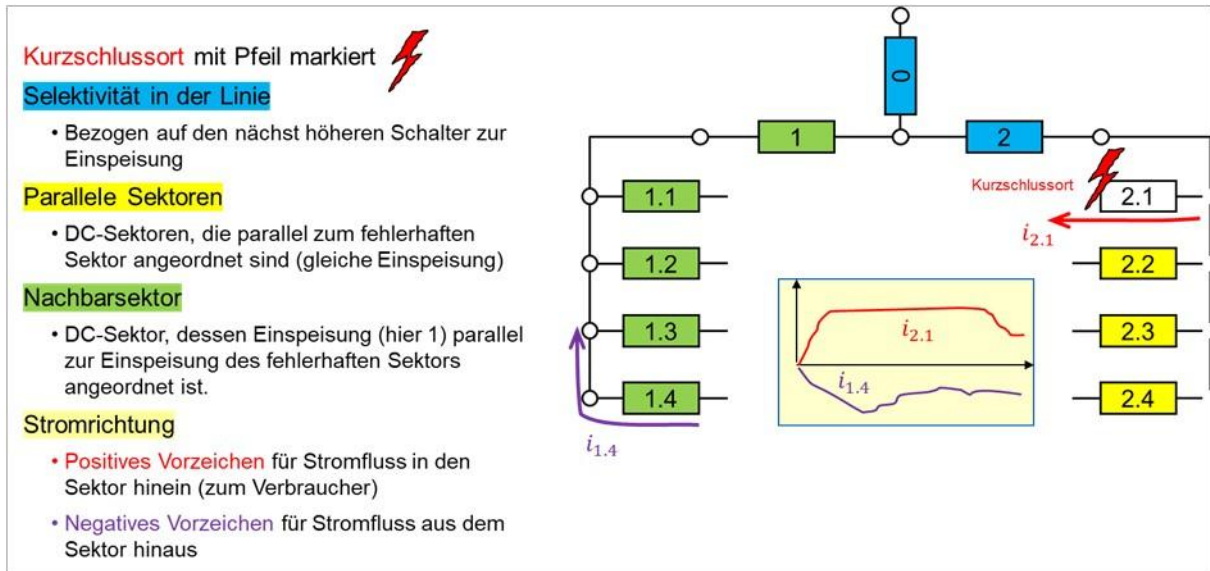
**8.4.3 Selektivität**

Selektivität ist die Fähigkeit einer Anlage, im Fehlerfall nur den unmittelbar betroffenen Anlagenteil auszuschalten, um einen Weiterbetrieb der fehlerfreien Teile und DC-Sektoren sicherzustellen. Durch die direkt parallelgeschalteten Speicher in einem DC-Netz wird die Gewährleistung der Selektivität herausfordernder als in einer traditionellen linearen Struktur mit zentralem Erzeuger, da im Fehlerfall alle Speicher versuchen, sich in die Fehlerstelle zu entladen.

Für die Selektivität ist daher sicherzustellen, dass die Schutzschalter dieser nicht betroffenen DC-Sektoren beim Speisen eines Fehlerstroms aus Speichern ihres Sektors in den Fehlerzweig hinein nicht auslösen. Dies kann z.B. über die Erkennung der Stromrichtung im DC-Abzweig erfolgen. Bei Stromfluss in Richtung des DC-Netzes soll die Auslösung des Leistungsschalters verzögert werden, um dem Schalter des fehlerhaften Zweiges Zeit zum Abschalten des Fehlers zu geben.

In parallelen Sektoren können Spannungseinbrüche zum Abschalten von Geräten führen. Wenn dies verhindert werden soll, muss entsprechend schnell abgeschaltet oder andere Vorkehrungen zur Spannungsstabilisierung (z. B. Entkoppeldiode, USV) getroffen werden.

Weiterhin dürfen in einer selektiven Anlage auch die Schutzschalter in den nächsthöheren Hierarchieebenen bei Kurzschluss in einem untergeordneten DC-Sektor nicht auslösen. In Bild 8.2 darf für Selektivität beim dargestellten Kurzschluss in Sektor 2.1 nur der Schalter dieses Sektors ausschalten. Die Schalter der parallel angeordneten, gelb hinterlegten, Schutzschalter (2.x), der Nachbarn 1.x (grün) sowie der nächsthöheren Hierarchieebenen (im Bild mit 2 und 0 bezeichnet, blaue Kästen) sollen eingeschaltet bleiben.



**Bild 8.2 – Veranschaulichungen zur Selektivität**

Bei Kurzschluss auf der DC-Sammelschiene schalten alle Leistungsschalter der DC-Sektoren, die Energie in den Fehler hinein speisen können, ab. Durch die Zwischenkreiskondensatoren betrifft dies in der Regel alle Sektoren.

Vorteilhaft wegen ihrer schnellen Reaktion sind elektronische Überstromschutzorgane, diese schalten den Kurzschlussstrom so schnell ab, dass Beeinträchtigungen in parallelen Sektoren effektiv vermieden werden; dazu wird voraussichtlich im Jahr 2026 die IEC 60947-10 (Semiconductor circuit breakers) veröffentlicht. Einfache DC-Schmelzsicherungen sind bezüglich des Schaltverhaltens deutlich langsamer.

#### 8.4.4 Schutz bei Überlast

In Wechsel- und Gleichspannungsnetzen können folgende Schutzmaßnahmen eingesetzt werden:

- Schutz durch Überstromschutzeinrichtung mit einer Auslösekennlinie, die der Strombelastbarkeit der Leitung entspricht.
- Eine Überlastung der Leitungen kann unter bestimmten Voraussetzungen (siehe auch DIN VDE 0100-430:202x, Anhang A, IEC 60364-4-43:2023, Annex A) durch die Limitierung des Stromes der Quelle oder des Verbrauchers verhindert werden (Gebrauchsanweisung/Installationsanleitung). Bei mehreren Quellen/Verbrauchern ist eine Systembetrachtung bei mehreren Quellen erforderlich.

Wie beim Kurzschluss, muss neben dem Schutz der Kabel und Leitungen auch der Schutz von weiteren stromführenden Betriebsmitteln (insbesondere Halbleiter) und deren Belastbarkeiten berücksichtigt werden.

## 8.5 Schutz bei Überspannungen

*Zitat aus DIN VDE 0100-100*

*Personen oder Nutztiere müssen gegen Verletzungen und Sachwerte müssen gegen alle schädigenden Einwirkungen geschützt sein, die Folge eines Fehlers zwischen aktiven Teilen von Stromkreisen unterschiedlicher Spannungen sind.*

*Personen oder Nutztiere müssen gegen Verletzungen und Sachwerte müssen gegen Schäden durch Überspannungen geschützt sein, die Folge von atmosphärischen Einwirkungen oder von Schaltüberspannungen sind.*

Für den Blitz- und Überspannungsschutz von Gleichstrominstallationen, sofern sie sich in baulichen Anlagen befinden oder wenn die Gleichstromleitungen in bauliche Anlagen eingeführt werden, sind die Anforderungen und Prinzipien der aktuellen Blitzschutznormenreihe DIN EN 62305-Reihe (VDE 0185-305-Reihe) anwendbar.

Wie bei Wechselstromanwendungen umfasst ein Blitzschutzsystem (LPS; en: Lightning Protection System) für DC-Anlagen den äußeren Blitzschutz (Fangeinrichtung, Ableitungen, Erdungsanlage) und den inneren Blitzschutz (Blitzschutzpotentialausgleich mit koordinierten SPD-System, Trennungsabstand).

Für Blitz- und Überspannungsschutz gelten in Gleichstrominstallationen folgende Normen:

- Blitzschutzsysteme sind auch bei DC-Anlagen nach der Normenreihe IEC 62305-Reihe auszuführen.
- DIN VDE 0100-443 (Schutz bei transienten Überspannungen) deckt bereits AC und DC-Systeme ab.
- DIN VDE 0100-534 (Überspannungsschutzeinrichtungen, SPDs) wird aktuell bezüglich der Auswahlkriterien und Anforderungen an DC SPDs überarbeitet.
- Überspannungsschutzgeräte (SPDs) sind in folgenden Normen beschrieben:
- IEC 61643-21 für SPDs in Telekommunikation und signalverarbeitenden Netzwerken (z. B. Sensorik in DC-Anlagen, Bussysteme)
- IEC 61643-41 für SPDs in DC-Systemen
- DIN EN 61643-31 für SPDs in Photovoltaik Installationen.

In diesen Normen sind jedoch alle für den Überspannungsschutz relevanten Systemparameter aktuell noch nicht abschließend normativ beschrieben. Im „Anhang D“ der E DIN VDE 0100-534/A2 werden Planungsgrundlagen zur Auswahl von SPDs in DC-Netzen/Systemen aufgeführt.

Das besondere und möglicherweise erhöhte Risiko von Schaltüberspannungen in DC-Anlagen wird derzeit geprüft.

## 9 Auswahl der Betriebsmittel

### 9.1 Allgemeines

Alle Geräte müssen für DC geeignet sein.

### 9.2 Allgemeine Bestimmungen nach DIN VDE 0100-510 (Strom, Spannung, Leistung, äußere Einflüsse, ...)

Im IEC/TR 63282 (LVDC systems – Assessment of standard voltages and power quality requirements) werden ausführliche Informationen für DC-Spannungen und Spannungsbänder gegeben.

Zusätzlich gelten die allgemeinen Hinweise aus DIN VDE 0100-510.

### 9.3 Betriebsmittel zum Schutz gegen elektrischen Schlag

Über die Geräte nach DIN VDE 0100-530 (IEC 60364-5-53) hinaus sind die folgenden Schaltgeräte geeignet:

- Semiconductor Circuit-Breakers nach IEC 60947-10 ED1 (FDIS-Stadium)
- Semiconductor RCBO nach IEC 63464-1 (Erstausgabe in Bearbeitung)
- DC-RCCB nach IEC 63053-2 (Erstausgabe in Bearbeitung)

## 9.4 Betriebsmittel zum Schutz gegen thermische Auswirkungen

Für Kabel und Leitungen beschreibt die DIN VDE 0100-520, dass die Nennspannung eines DC-Systems bis zum 1.5-fachen der AC-Bemessungsspannung der Leitung bzw. des Kabels betragen darf.

IEC/TR 61641 (Enclosed low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Guide for testing under conditions of arcing due to internal fault) und IEC/TS 63107 (Integration of internal arc-fault mitigation systems in power switchgear and controlgear assemblies (PSC assemblies) according to IEC 61439-2) beschäftigen sich mit thermischen Auswirkungen von seriellen Fehlerlichtbögen. Zukünftig gilt hier IEC/TS 61641 (Low-voltage switchgear and controlgear assemblies – Internal arc-fault protection of low-voltage switchgear and controlgear assemblies in accordance with the IEC 61439 series), die Erstausgabe ist in Bearbeitung. Dieser neue TS beinhaltet unter anderem die IEC/TR 61641 und die IEC/TS 63107.

Zum Schutz vor Brandrisiken in IT-Systemen sind die Normen DIN VDE 0100-530 und die DIN EN 61557-8 zu beachten. In der Produktnorm DIN EN 61557-8 (Insulation monitoring devices IMD) sind im Abschnitt 4.2 die verschiedenen Typen bereits klassifiziert und auch die Produkte dazu seit vielen Jahren im Einsatz.

Zum Schutz vor seriellen Fehlerlichtbögen gibt es zurzeit keine für Gleichspannung geeignete AFDD (Arc fault detection devices), ihr Einsatz kann daher in den Installationsnormen noch nicht gefordert werden. Deshalb ist mit besonderer Sorgfalt auf die Ausführung von lösbaren elektrischen Verbindungen zu achten.

Nach DIN VDE 0100-410, Abschnitt 411.6.3.2 und DIN VDE 0100-530, Abschnitt 538.4.2 ist jedoch auch der Einsatz von Differenzstrom-Überwachungseinrichtungen (RCM) möglich.

## 9.5 Betriebsmittel zum Schutz bei Überströmen

### 9.5.1 Allgemeines

Die Bemessungsspannung für die Schutzorgane ist die Spannung  $U_4$  (also 800 V) aus Bild 5.2 vom Spannungsband B4 (Abschnitt 5.2).

Die folgende Liste gibt einen Überblick über die verschiedenen Schutzgeräte für den Überlast- und Kurzschlusschutz. Grundsätzlich ist die Auswahl des Schutzgerätes anhand der konkreten Anlagenparameter vorzunehmen. Bei der Auswahl des geeigneten Schutzgerätes ist neben dem Überlast- und Kurzschlusschutz besonders auch die Verhinderung von Unterspannungsfehlern zu betrachten.

- Nach DIN VDE 0100-530
- Halbleiterleistungsschalter (SCCB) nach Entwurf IEC 60947-10
- Hybridleistungsschalter (SCHCB) nach Entwurf IEC 60947-10
- Niederspannungssicherungen (vorzugsweise Charakteristiken gR, aR, gBAT, aBAT, gS)
- mech. Leitungsschutzschalter nach IEC 60898-2
- mech. Leistungsschalter nach IEC 60947-2

Tabelle 9.1 gibt einen Überblick zur Eignung der verschiedenen Schutzgeräte für den Kurzschluss-, Erdschluss- und Leitungsschutz, um Unterspannung und damit das Abschalten von fehlerfreien Zweigen zu vermeiden. Grundsätzlich ist die Auswahl des Schutzgerätes anhand der konkreten Anlagenparameter vorzunehmen. Die Bewertung basiert auf [11].

**Tabelle 9.1 – Eigenschaften verschiedener Schutzgeräte bei Kurz- und Erdschluss, um Unterspannung zu vermeiden**

Fehlerart	Halbleiter-schalter (SCCB)	Hybridschalter (SCHCB)	Schmelzsicherung	Mech. Überstrom-schutz
<b>Kurzschluss</b>				
Schnelles Abschalten	+	+	0	-
Selektivität (seriell)	+	+	+	-
Selektivität (parallel)	+	-	-	-

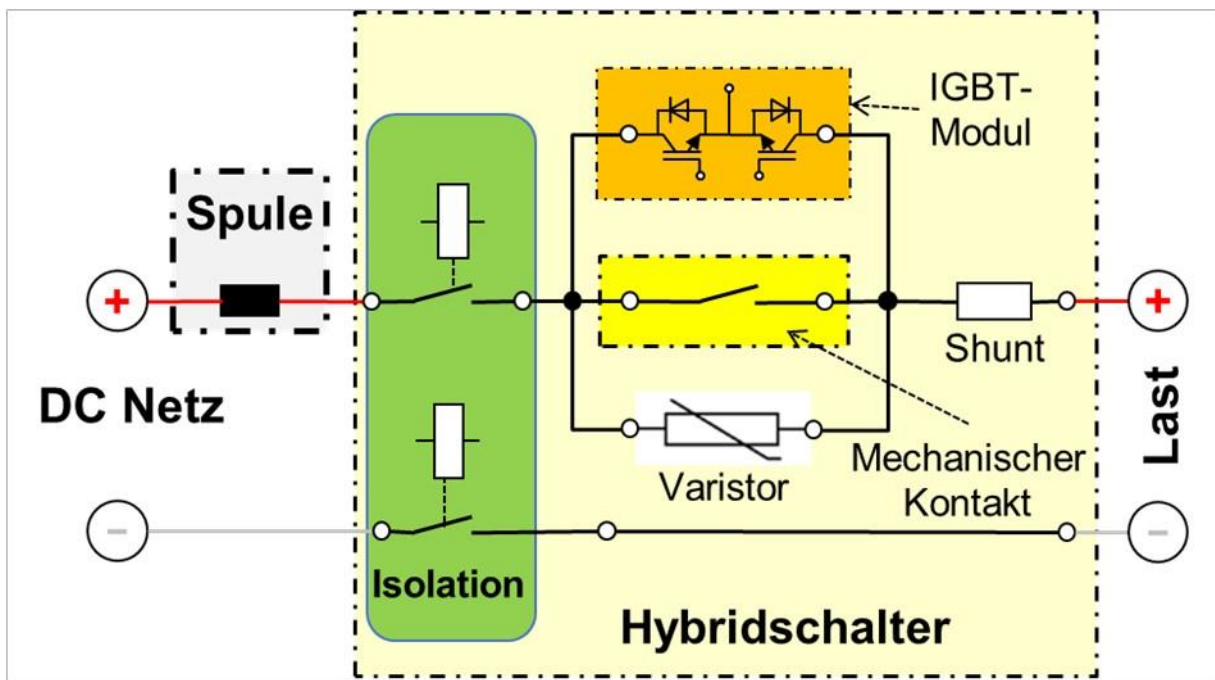
Erdschluss				
Schnelles Abschalten	+	+	+	-
Selektivität (seriell)	+	0	+	-
Leitungsschutz				
	+	+	+	+

Dabei: +: geeignet, 0: bedingt geeignet, -: nicht geeignet

### 9.5.2 Hybridschalter

Bei einem Hybridschalter sind ein mechanischer, niederohmiger Kontakt zur Führung des Dauerstroms und ein Halbleitermodul zur Abschaltung parallelgeschaltet. Damit wird geringe Verlustleistung und schnelleres Abschalten als bei einem reinen mechanischen Schalter kombiniert. Bild 9.1 zeigt die prinzipielle Schaltung eines Hybridschalters mit mechanischen Kontakten zur dauerhaften Führung des Betriebsstroms (gelb hinterlegt) sowie Leistungshalbleitern (orange) zum Unterbrechen des Stroms. Parallel zu beiden begrenzt ein Varistor die Spannung und übernimmt den Stromfluss, nachdem das Halbleitermodul ausgeschaltet wurde.

Für die zweipolige Isolation werden bei einem Fehler in einem Pol immer beide Pole getrennt – im Bild mit den Isolationskontakten (grün) symbolisiert. Zur Reduzierung der Steilheit des Stromanstiegs im Fehlerfall und in Abstimmung mit der Stromtragfähigkeit der Schaltelemente ist typischerweise eine Spule in Reihe mit dem Hybridschalter angeordnet<sup>9</sup>. Diese Spule erhöht wiederum die Verlustleistung und benötigt Platz im Schaltschrank.



**Bild 9.1 – Prinzip-Schaltbild eines einpoligen Hybrid-Leistungsschalters<sup>10</sup> [8]**

Der Hybridschalter in Bild 9.1 wird wie folgt ausgeschaltet (sowohl bei betriebsmäßigen Schaltungen als auch im Fehlerfall):

- Signal an den Aktor des mechanischen Kontakts zum Öffnen und Durchschalten des Halbleitermoduls in den leitfähigen Zustand.

<sup>9</sup> Bei den Modellanlagen in DC-INDUSTRIE betrug die Induktivität der Spulen im Fehlerkreis etwa 130  $\mu\text{H}$  (Hybridschalter mit 100 A Nennstrom). Die Ausschaltzeit der Hybridschalter (d.h. von Beginn des Stromflusses bis zum Abklingen des Stroms über den Varistor) war typisch kleiner als 1 ms und die Energie  $\int i^2 dt$  betrug beim Ausschalten von Kurzschlüssen nur etwa 1 % der Energie von mechanischen Leistungsschaltern gleichen Nennstroms.

<sup>10</sup> Hier in der einpoligen Variante dargestellt. Vorteilhaft ist es, die Spule auf beide Pole aufzuteilen.

- Beim ersten Öffnen des mechanischen Kontakts entsteht ein Lichtbogen mit seiner Lichtbogen-Spannung von typisch etwa 20 Volt (bei den Schaltern aus DC-INDUSTRIE2 beträgt diese Zeit ab Ausschaltsignal ca. 250  $\mu$ s). Diese Spannung ist deutlich höher als die Durchlassspannung des Halbleitermoduls (ca. 3 Volt).
- Der Strom kommutiert vom mechanischen Kontakt auf das Halbleitermodul. Entscheidend für eine schnelle Kommutierung und damit schnelles Verlöschen des Lichtbogens ist eine kleine Induktivität der Stromschleife zwischen beiden Strompfaden.
- Der mechanische Kontakt öffnet weiter. Wenn er die nötige Öffnungsstrecke erreicht hat, um der wiederkehrenden Netzspannung standzuhalten, wird der Halbleiter abgeschaltet und der Strom kommutiert in den parallel angeordneten Varistor, der die Spannung begrenzt und den Strom zu Null führt.
- Schließlich werden die Isolationskontakte stromlos geöffnet und damit ist der Schaltvorgang abgeschlossen.

Beim Einschalten ist die Abfolge umgekehrt, also erst Isolationskontakte schließen, dann Halbleiter einschalten und schließlich die mechanischen Kontakte schließen.

### 9.5.3 Halbleiterschalter

Bei einem Halbleiterschalter übernehmen bidirektionale Leistungshalbleiter sowohl die dauerhafte Stromführung als auch das Ein- und Ausschalten. Da keine mechanischen Teile bewegt werden müssen, können diese Schalter sehr schnell, innerhalb einiger Mikrosekunden, schalten, sobald der Fehlerstrom erkannt wurde. Damit ist auch die Fehlerenergie ( $\int i^2 dt$ ) nochmals kleiner als bei Hybridschaltern. Der prinzipielle Aufbau eines Halbleiterschalters ist in Bild 9.2 dargestellt. Wie beim Hybrid-schalter sorgt auch hier ein Varistor dafür, dass die Spannung begrenzt wird und Isolationskontakte in Reihe sorgen für die sichere Trennung beider Pole.

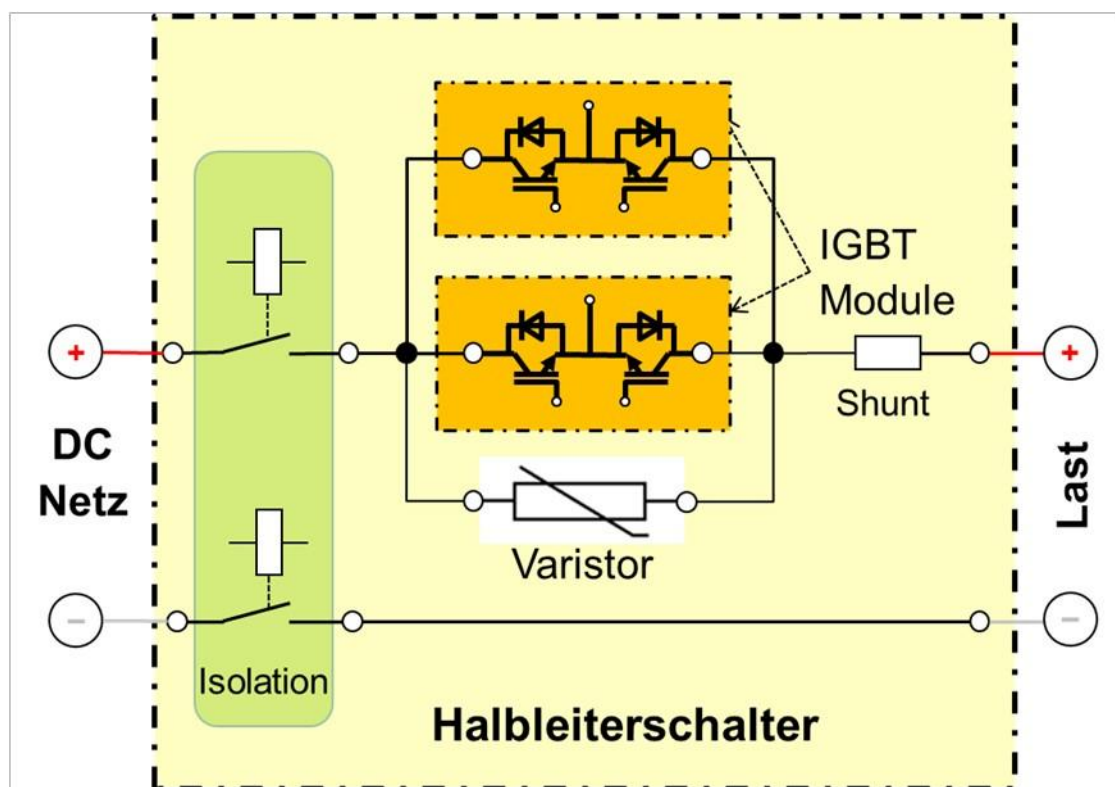


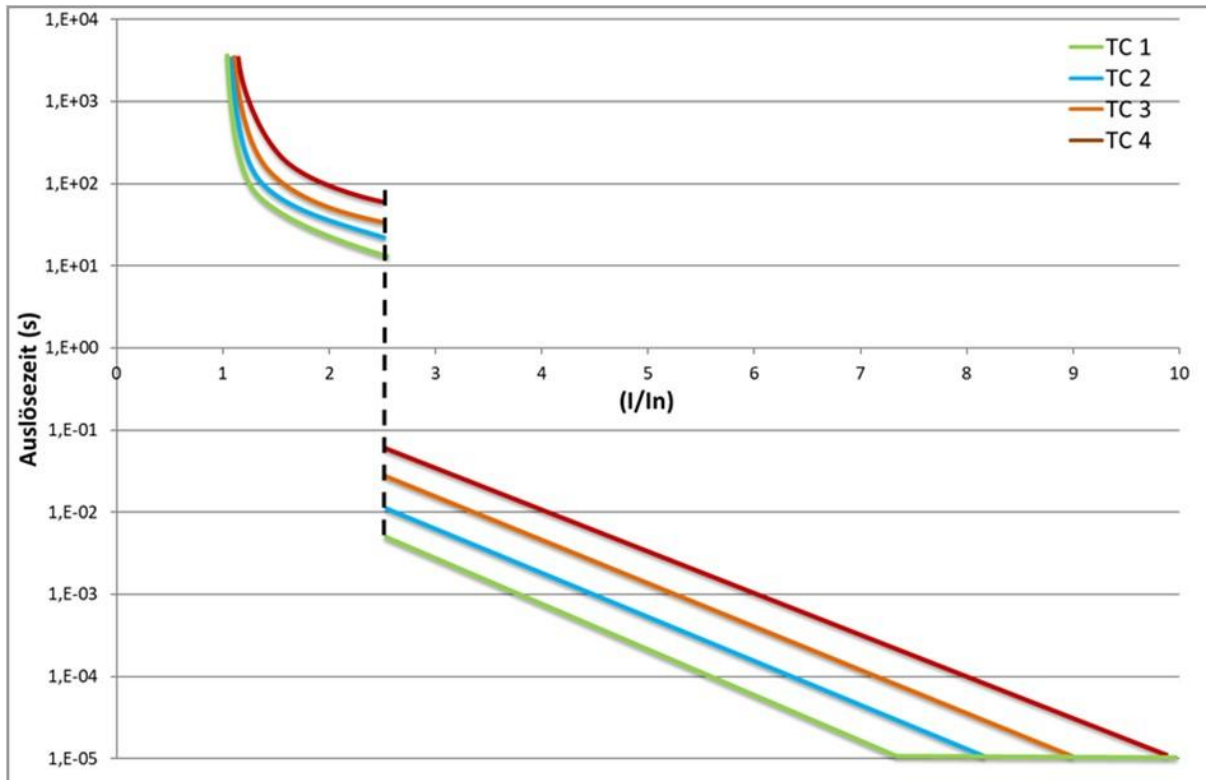
Bild 9.2 – Prinzip-Schaltbild eines einpoligen Halbleiterschalters <sup>11</sup> [9]

Der Aus- und Einschaltvorgang erfolgt hier komplett lichtbogenfrei. Die Anzahl der Schaltvorgänge ist nahezu unbegrenzt. Durch Parallelschaltung von Halbleitermodulen kann die Stromtragfähigkeit erhöht bzw. die Verlustleistung reduziert werden.

<sup>11</sup> Hier mit Schutz in einem Pol dargestellt, typisch ist aber Schutz in beiden Polen

Ein Nachteil von Halbleiterschaltern ist die höhere Verlustleistung bei Nennstrom wegen der Durchlassspannung der Halbleiter. Maßnahmen zum Abführen der Verlustleistung sind daher insbesondere bei höheren Nennströmen vorzusehen.

Bild 9.3 zeigt das Beispiel einer Auslösekennlinie eines Halbleiter-Leistungsschalters für 40 A Nennstrom. Strom-Zeit Profile unterhalb der Kennlinie sind zulässig, während der Schalter oberhalb der Kennlinie auslöst. Mit vier Auslösecharakteristiken (TC = trip characteristic) kann die Trägheit der Auslösung eingestellt werden. Der Bereich links oben (<2.5-facher Nennstrom) ist der Überlastbereich und bei größeren Strömen erfolgt die Ausschaltung deutlich schneller.



**Bild 9.3 – Auslösekennlinie eines Halbleiterschalters [Eaton]**

#### 9.5.4 DC-Sicherungen

Auch Sicherungen können in DC-Netzen eingesetzt werden. Sie sind eine kostengünstige Alternative zu Leistungsschaltern, müssen aber nach dem Abschalten eines Fehlers ausgetauscht werden. Nachteilig bei Sicherungen sind typischerweise deutlich längere Ausschaltzeiten als bei elektronischen Überstromschutzorganen. Dadurch ist es im Vergleich zu Halbleiter- und Hybridschaltern deutlich schwieriger den Fehler auf den betroffenen DC-Sektor zu begrenzen.

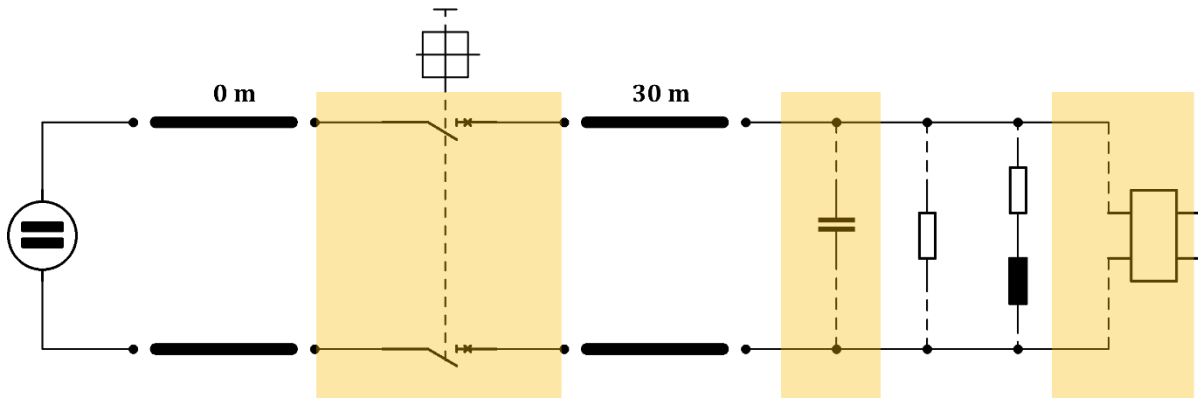
Für DC-Sicherungen sind nach den Vorschriften für Kurzschlussprüfungen Zeitkonstanten von mindestens einer Millisekunde spezifiziert, bei Kurzschlussstrom > 20 kA sind 15 ms bis 20 ms gefordert [25], für Photovoltaiksicherungen (gPV) werden 1 ms bis 3 ms angegeben [26]. In industriellen DC-Anwendungen mit niedriger Induktivität können die Zeitkonstanten mit Werten deutlich unter 1 ms sehr viel kleiner sein (siehe auch Abschnitt 9.5.5).

#### 9.5.5 Energie, Überspannung und Zeitkonstanten-Betrachtung beim Schalten

Wichtig für das Auslöseverhalten von Überstromschutzorganen, insbesondere DC-Sicherungen, ist die Zeitkonstante  $\tau = L / R$  des fehlerhaften Stromkreises. Da bei schnellen Schutzorganen der stationäre Zustand in der Regel nicht erreicht wird, ist die Induktivität bestimmend. Je größer die Induktivität, desto höher ist die Energie  $E = 0.5 \cdot L \cdot I^2$ , die beim Ausschalten in mechanischen Schutzgeräten und Sicherungen als Lichtbogen und somit auch in Wärme umgesetzt wird. Somit bestimmt die Zeitkonstante auch das Ausschaltvermögen der DC-Schutzorgane.

Tabelle 9 2 gibt einen exemplarischen Überblick über typische Zeitkonstanten in DC-Anwendungen.

Zum Schutz und betriebsmäßigen Schalten von Leitungen und Geräten werden schaltbare Überstromschutzorgane eingesetzt. Eine solche Konfiguration ist nachfolgend vereinfacht dargestellt (Bild 9.4).



**Bild 9.4 – Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Leitungsnachbildung**

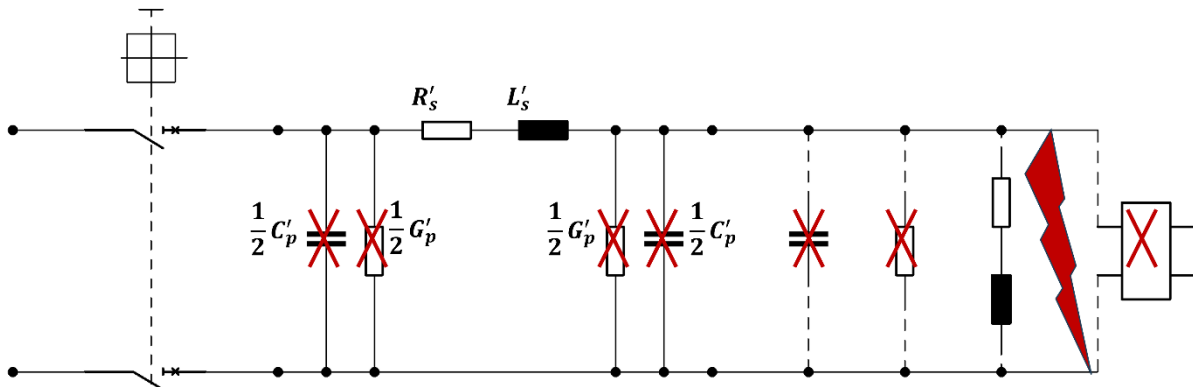
Gespeist aus einer Spannungsquelle und angebunden über Leitungen unterschiedlicher Länge schalten und sichern die vorgelagerten Schutzorgane verschiedenste Lasten. Konzeptionell werden in DC-Netzen keine großen induktiven Lasten eingesetzt. Häufig handelt es sich im Fall der Lasten um umrichter gespeiste Geräte, die große Eingangskapazitäten aufweisen können.

Nachfolgend wird unterschieden zwischen:

1. Betriebsmäßigen Schalten im Nennbetrieb  
häufig kapazitive Lasten, kann aber auch ohmsch oder ohmsch-induktiv sein
2. Schalten im Fehlerfall bei Überstrom  
zumeist ohmsch-induktives Schalten

In diesem Abschnitt wird das Schalten bei Überstrom als Konsequenz eines elektrischen Fehlers der Last oder einer Leitung in Lastnähe betrachtet. Das Auslöseverhalten von Überstromschutzorganen ist durch die Auslösekennlinie und das Betriebsverhalten des abzusichernden Objekts bzw. der Last bestimmt.

Leitungen werden diskretisiert in  $\pi$ -Ersatzanordnungen vereinfacht, üblicherweise als Leitungsbeläge angegeben. Das Ersatzschaltbild vereinfacht sich (Bild 9.5).



**Bild 9.5 – Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Leitungsnachbildung im Kurzschlussfall**

Queradmittanzen  $G$  und Eingangskondensatoren  $C$  sind im Fall des Überstroms vernachlässigbar. Die Lasten/Fehlerstelle im Zweig vereinfachen sich zu einer ohmsch-induktiven Anordnung, welche im Kurzschlussfall gegen  $0 \Omega$  geht. Im niederohmigen Kurzschlussfall vereinfacht sich die Anordnung weiter zu rein leitungsbestimmten Größen.

$$u_0(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \Delta u_s(t)$$

Vereinfacht ergibt sich der Stromverlauf  $i(t)$  zu:

$$i(t) = \frac{U_p}{R} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \text{homogene Lösung DGL 1 Ordnung } \tau = \frac{L}{R}$$

Im fehlerhaften Lastzweig muss die induktive Energie  $W_{ind}$  umgewandelt werden, damit der Überstrom zu  $0 \text{ A}$  gezwungen werden kann. Diese Energie beträgt:

Im fehlerhaften Lastzweig muss die induktive Energie  $W_{ind}$  umgewandelt werden, damit der Überstrom zu 0 A gezwungen werden kann. Diese Energie beträgt:

$$W_{ind} = \frac{1}{2} LI^2$$

Zu diesem Zweck muss die Schalterspannung oder auch Lichtbogenspannung über die treibende Spannung hinaus erhöht und aufrechterhalten werden, bis der Strom 0 A erreicht. An eingesetzten

Schutzorganen können hierbei sogenannte Schalt-Überspannungen auftreten, welche im Fall von Sicherungen beispielsweise, nach IEC 60269-1 – Tabelle 6 – Höchstwerte der Lichtbogenspannung, im Bereich der 4-fachen Nennspannung liegen können. Somit bestimmt die Zeitkonstante auch das Ausschaltvermögen der DC-Schutzorgane.

Tabelle 9.2 gibt einen exemplarischen Überblick über typische Zeitkonstanten in DC-Anwendungen

**Tabelle 9.2 – Typische Zeitkonstanten in DC-Stromkreisen (Quelle Sicherungshandbuch Dr. Bessei S.50 [24])**

Anwendung	Zeitkonstante
DC-Industriesteuerungen	≤ 10 ms
Batteriestromkreise	≤ 5 ms
DC-Motoren und Antriebe	20 bis 40 ms
Elektromagnete	bis 1000 ms
Photovoltaikanlagen	1 bis 3 ms
Spannungszwischenkreiswechselrichter	1 bis 3 ms

Im Leitungsschutz ist die Zeitkonstante unabhängig von der Leitungslänge und nur vom Leiterquerschnitt abhängig. Für typische Leitungen nach Tabelle 5.3 aus [11] ergeben sich die Zeitkonstanten aus Tabelle 9.3. Konzeptionell sollen im DC-Netz keine großen Induktivitäten eingebaut werden und die DC-versorgten Geräte haben i.d.R. eine große Eingangskapazität. Folglich ergibt sich für den Kurzschlussfall die Zeitkonstante hauptsächlich durch die Leitungen und durch parasitäre Eigenschaften von Funkentstörfiltern (z. B. Streuinduktivität und Widerstand von Gleichtaktdrosseln). Bei Leitungen werden Induktivität und Widerstand üblicherweise als Leitungsbeläge angegeben; damit ist die Zeitkonstante unabhängig von der Leitungslänge und nur vom Leiterquerschnitt abhängig.

**Tabelle 9.3 – Typische Zeitkonstanten L/R der Leitungen**

Leiterquerschnitt in mm <sup>2</sup>	Widerstandsbelag in Ω/km	Induktivitätsbelag in mH/km	Zeitkonstante in μs
1,5	13,3	0,53	39,8
2,5	7,98	0,51	63,9
4	4,95	0,47	94,9
6	3,30	0,44	133,3
10	1,91	0,43	225,1
16	1,21	0,41	338,8

Relevanter als die Betrachtung der Zeitkonstante und des prospektiven Kurzschlussstroms für den Schutz vor Überstrom ist bei DC-Systemen mit Halbleiterschutz die Stromsteilheit  $di/dt$  bei Kurzschlusseintritt. Durch die sehr schnelle Abschaltung mit Leistungshalbleitern (einige Mikrosekunden bei reinen Halbleiterschaltern [11]) wird eine extrem starke Strombegrenzung erreicht und der theoretisch auftretende prospektive Kurzschlussstrom spielt keine Rolle.

Auch die Energie beim Schalten,  $\int i^2 dt$ , ist mit Halbleiterschaltern um Größenordnungen niedriger als bei klassischen elektromechanischen Schaltgeräten, bei Hybridschaltern etwa nur 1 % und bei Halbleiterschaltern noch geringer.

Die Stromsteilheit bei Kurzschlusseintritt ist hierbei ebenfalls auslegungsrelevant und kann bestimmt werden zu:

$$\frac{di(t=0)}{dt} \approx -\frac{1}{\tau} \frac{U_p}{R} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] = \frac{U_p}{L}$$

## 9.6 Betriebsmittel zum Schutz bei Überspannungen

Siehe Abschnitt 8.5.

## 9.7 Betriebsmittel zum Trennen und Schalten

Siehe DIN VDE 0100-460 und DIN VDE 0100-530, Abschnitt 537 (Trennen und betriebsmäßiges Schalten). Es sind Geräte einzusetzen, die für DC geeignet sind.

## 9.8 Steckverbinder/Steckvorrichtung

Steckverbinder werden nicht unter Last oder spannungsführend gesteckt oder getrennt [Quelle: DIN EN 61984 (VDE 0627):2009-11] (connector without breaking capacity, COC).

Die Funktionen und Ausprägungen können mit Steckverbindern in den Verriegelungsstufen 1 – 5, die größtenteils schon zugelassen sind, realisiert werden:

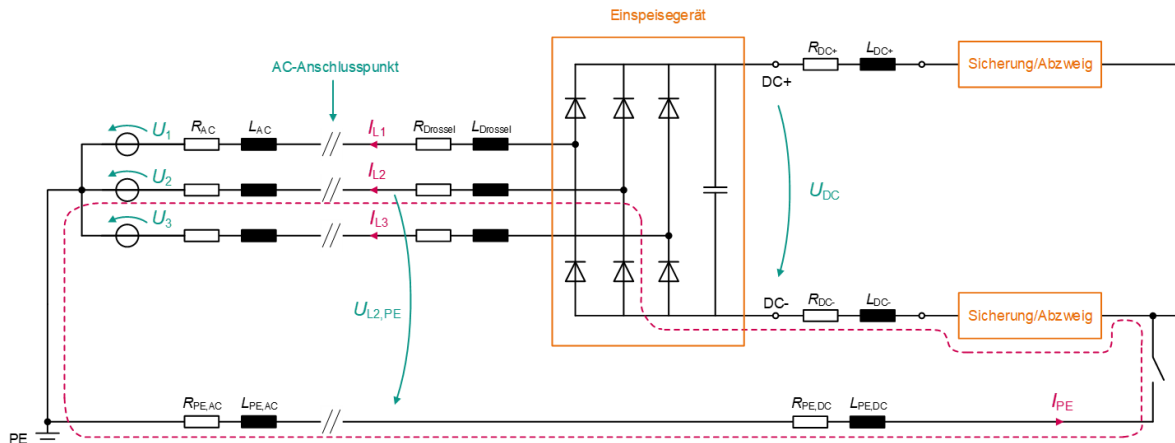
Verriegelungsstufen	Funktionen
1	Trennen einer Steckverbindung durch Ziehen des Steckverbinders ohne Verriegelung
2	Trennen einer Steckverbindung durch die bewusste Entriegelung per Hand (z. B. Sicherungsbügel oder Rändel)
3	Trennen einer Steckverbindung mittels Freigabe durch eine Standardfachwerkzeug (z. B. Schraubendreher)
4	Trennen einer Steckverbindung mittels Freigabe durch einen autorisierenden Schlüssel (z. B. schließfähiger Sicherungsbügel, NFC) bzw. eine Spezialwerkzeug
5	Trennen einer Steckverbindung mittels Freigabe <ul style="list-style-type: none"> <li>a. einer automatischen Verriegelung durch das autorisierte Öffnen (Spannungsmessung im Schaltschrank) per Signal an eine Steckverbindung</li> <li>b. einer automatischen Verriegelung durch das autorisierte Öffnen (Spannungsmessung in einer Steckverbindung)</li> </ul>

Steckvorrichtungen zeichnen sich dadurch aus, dass sie ein Schaltvermögen haben (connector with breaking capacity, CWC), sie können im bestimmungsgemäßen Gebrauch auch unter Last oder spannungsführend gesteckt oder getrennt werden.

## 10 Bestimmung der maximalen Kabel- und Leitungslängen

### 10.1 Schleifenimpedanz bei AC-seitiger Erdung

Bei AC-seitiger Erdung schließt sich die Fehlerschleife über das vorgelagerte AC-Netz. Im Ersatzschaltbild Bild 10.1 sind die Impedanzen sowie der Fehlerstrompfad dargestellt. Im Unterschied zum Kurzschluss sind keine relevanten Kapazitäten gegen Erde vorhanden, so dass der Fehlerstrom fast ausschließlich durch die AC-Netzspannung getrieben wird und immer über das versorgende Einspeisegerät fließt. Dadurch ist auch die Zeitkonstante in der Fehlerschleife vergleichbar mit AC und liegt üblicherweise im Bereich einiger Millisekunden. Dies wurde bei Messungen bestätigt, detaillierte Informationen befinden sich im Anhang D.9 des DC-INDUSTRIE2-Systemkonzepts [11].



**Bild 10.1 – Ersatzschaltbild für Erdschlussfehler bei AC-seitiger Erdung**

Zur Einhaltung der maximalen Abschaltzeiten (0,4 s im TN-Netz bis 400 V Leiter-Erde-Spannung, nach DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410), Tabelle 41.1:2018-10 muss der Impedanz der Fehlerschleife (Schleifenimpedanz siehe gestrichelter Strompfad in Bild 10.1) besondere Beachtung geschenkt werden. Es ist zu erkennen, dass sich die Schleifenimpedanz aus einem AC- und einem DC-seitigen Anteil zusammensetzt. Zusätzlich muss das Einspeisegerät mit seinen Eigenschaften berücksichtigt werden. Die Schleifenimpedanz bestimmt in Kombination mit der treibenden Netzspannung den prospektiven Fehlerstrom an der Fehlerstelle. Mit dem prospektiven Fehlerstrom kann wiederum die Abschaltzeit des Überstromschutzorgans bestimmt werden.

Die Anforderungen für den Schutz gegen elektrischen Schlag durch automatische Abschaltung der Stromversorgung können mit Hilfe der Messung der Fehlerschleifenimpedanz als erfüllt angesehen werden, wenn nach DIN VDE 0100-600 (VDE 0100-600) folgende Bedingung eingehalten ist:

$$Z_{S(m)} \leq \frac{2}{3} \times \frac{U_{DC,FS}}{I_a}$$

Dabei ist:

$Z_{S(m)}$  die gemessene Impedanz der Fehlerschleife, beginnend und endend an der Fehlerstelle, bestehend aus einem AC-Anteil und einem DC-Anteil

$U_{DC,FS}$  die Spannung zwischen Außenleiter und geerdetem Schutzleiter

$I_a$  der Strom, der die automatische Auslösung der Schutzeinrichtung innerhalb der angegebenen Zeit nach DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410) festgelegten Bedingungen bewirkt

Die Spannung  $U_{DC,FS}$  ist abhängig vom verwendeten Drehstromgleichrichter und deren Pulsanzahl, siehe Tabelle 10.1 - dabei ist  $U_n$  die Leiter-Leiter-Spannung der AC-Seite [30].

**Tabelle 10.1 – Spannung der Erdfehlerschleife bei AC-seitiger Erdung**

Schaltung	Gleichrichtwert $U_{DC}$	Spannung der Fehlerschleife $U_{DC,FS}$
B6 (sechspulsig)	$U_{DC} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} U_n \approx 1,35 U_n$	$U_{DC,FS} = \frac{1}{2} U_{DC} \approx 0,675 U_n$
B6-2S (12-pulsig)	$U_{DC} = \frac{6}{\pi} \sqrt{2} U_n \approx 2,7 U_n$	$U_{DC,FS} = \frac{1}{2} U_{DC} \approx 1,35 U_n$

Da Stand heute, kein geeignetes Gerät für die Messung der kompletten Schleifenimpedanz existiert, muss eine abschnittsweise Überprüfung stattfinden<sup>12</sup>.

Folgendes Vorgehen wird für die Ermittlung der Schleifenimpedanz vorgeschlagen (siehe auch Abschnitt 11):

<sup>12</sup> Die abschnittsweise Bestimmung der Schleifenimpedanz wird grundsätzlich in der Fachschrift „Wiederkehrende Prüfungen elektrischer Anlagen und ortsfester Betriebsmittel“ der deutschen Unfallversicherung [28] in Abschnitt 3.4.1 und insbesondere in den Abbildungen 14.1 und 14.2 beschrieben.

1. Messung der AC-seitigen Schleifenimpedanz  $|Z_{S,AC}| = \sqrt{R_{S,AC}^2 + (\omega \cdot L_{S,AC})^2}$  vor dem Einspeisegerät mit einem Schleifenimpedanz-Messgerät nach IEC 61557-3.
2. Bestimmung des ohmschen Widerstands  $R_{S,DC}$  im DC-Anteil der Fehlerschleife (aktiver Leiter und Schutzleiter) durch Messung mit einem Prüfgerät nach IEC 61557-3 oder Berechnung.
3. Arithmetische Addition der beiden Anteile  $Z_{S(m)} = |Z_{S,AC}| + R_{S,DC}$
4. Berechnung der treibenden **DC-Spannung über der DC-Fehlerschleife**. Sie ist abhängig vom verwendeten Gleichrichter und dessen Ausführung und der Pulsanzahl siehe Tabelle 10.3 (dabei ist  $U_n$  die Leiter-Leiter-Spannung der AC-Seite).

**Tabelle 10.2 – Spannung der Erdfehlerschleife bei AC-seitiger Erdung**

Schaltung	Gleichrichtwert $U_{DC}$	Spannung der Fehlerschleife $U_{DC,FS}$
<b>B6</b> (sechspulsig)	$U_{DC} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} U_n \approx 1,35 U_n$	$U_{DC,FS} = \frac{1}{2} U_{DC} \approx 0,675 U_n$
<b>B12</b> (12-pulsig)	$U_{DC} = \frac{6}{\pi} \sqrt{2} U_n \approx 2,7 U_n$	$U_{DC,FS} = \frac{1}{2} U_{DC} \approx 1,35 U_n$

5. Bei der Berechnung des minimalen Erdkurzschlussstroms ist nach DIN EN 60909-0 die **Erhöhung der Leitertemperatur bei den Widerständen** sowohl auf der AC- als auch auf der DC-Seite zu berücksichtigen:

$$R_L = [1 + \alpha(\vartheta_e - 20^\circ\text{C})] \cdot R_{L20}$$

Mit:

$R_{L20}$ : Widerstand bei 20 °C

$\vartheta_e$ : Leitertemperatur bei Ende des Erdschlusses

$\alpha$ : Temperaturkoeffizient des Widerstands  
(Cu: 0,00393 1/K; Al: 0,00403 1/K)

6. Berechnung des **prospektiven Erdschlussstroms** nach DIN EN 60909-0 mit der minimalen Betriebsspannung auf der AC-Seite:

$$I_{k,PE} = \frac{c \cdot U_{DC,FS}}{\sqrt{(R_{AC} + R_{PE,AC} + R_{Drossel} + R_{DC} + R_{PE,DC})^2 + (\omega \cdot (L_{AC} + L_{Drossel} + L_{PE,AC}))^2}}$$

Mit

$c = 0,9$ : Spannungsfaktor zur Berücksichtigung der Betriebsspannung für kleinste Kurzschlussströme im Niederspannungsnetz

$U_{DC,FS}$ : Spannung der Fehlerschleife, siehe Tabelle 10.2

$R$  und  $L$ : Wie in Bild 10.1 dargestellt, unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses aus Punkt 5 dieser Aufzählung.

$\omega = 2\pi f$ : Kreisfrequenz der AC-Seite- mit Frequenz  $f$ .

7. Nun muss nur noch der **Kurzschluss-Auslösestrom des Schutzorgans** auf einen Wert niedriger als als  $I_{k,PE}$  eingestellt werden.

Bei diesem Verfahren werden die DC-seitigen Induktivitäten nicht berücksichtigt, da sie bei Zeitkonstanten  $\tau = \frac{L_{DC}}{R_{DC}} < 400$  ms keinen nennenswerten Einfluss auf den prospektiven Kurzschlussstrom haben. Weiterhin wird der Spannungsfall über dem Einspeisegerät (in Bild 10.1 nur die Durchlassspannung einer Gleichrichterdiode) vernachlässigt. Das Verfahren funktioniert gut für kleine Induktivitätswerte  $L_{AC}$ . Für größere AC-seitige Induktivitätswerte mit Zeitkonstanten  $\tau = \frac{L_{AC}}{R_{AC} + R_{DC}} > 3$  ms zeigen Simulationen, dass der mit dem Verfahren berechnete Wert deutlich niedriger ist als der simulierte<sup>13</sup>; damit liegt man aber auf der sicheren Seite. Da im industriellen Bereich üblicherweise sehr

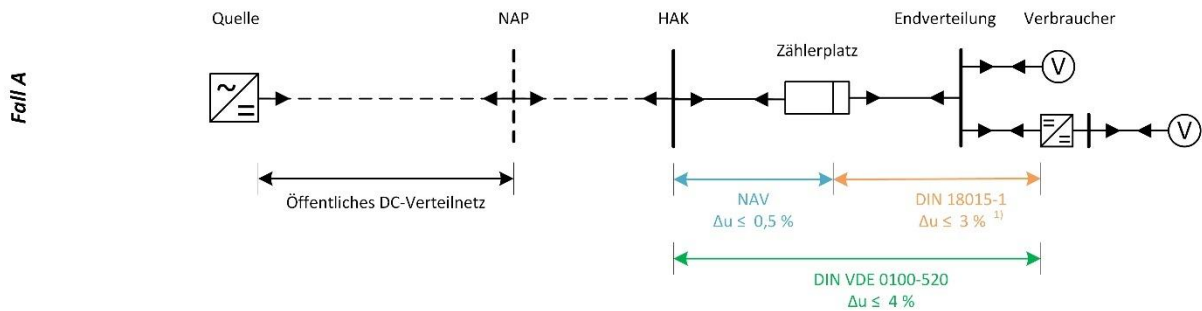
<sup>13</sup> Werden die Abschaltzeiten mit dem als zu niedrig berechneten Wert eingehalten, so werden sie bei realen, höheren Strömen in jedem Fall eingehalten.

hohe prospektive Kurzschlussströme auftreten, kann dieser einfache Ansatz in vielen Fällen für den Nachweis der maximalen Abschaltzeit verwendet werden.

## 10.2 Spannungsfall

Wie auch in AC-Netzen spiegeln sich Wärmeverluste bei der Übertragung von Energie in DC-Netzen im Spannungsfall wider. Während sich der Strom beim Spannungsfall nur linear niederschlägt, geht er bei den Übertragungsverlusten quadratisch ein. Daher wird bei der Planung von DC-Netzen empfohlen, den Spannungsfall aus den Erfahrungen in AC-Netzen zu übernehmen, d. h.

- Fall A) Wird ein DC-Netz direkt aus einem öffentlichen DC-Netz gespeist, wie z. B. Wohngebäude oder ähnlich genutzte Bereiche, so sollte der Spannungsfall ab dem Hausanschlusskasten (HAK) nicht mehr als 4 % betragen.

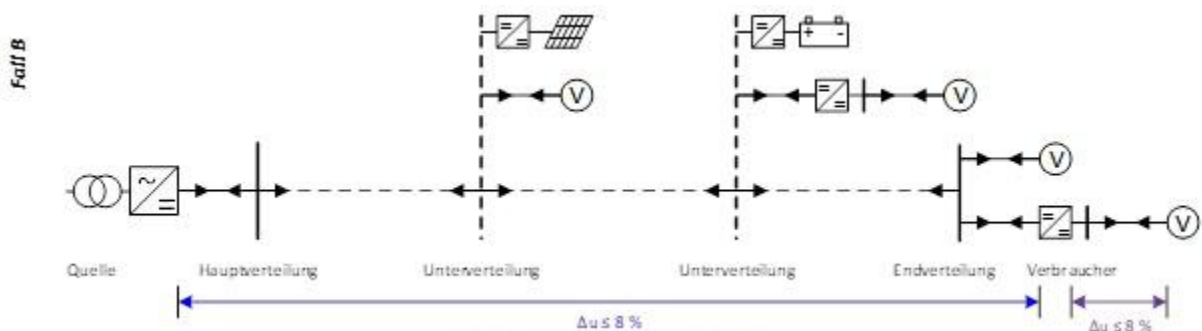


- 1) Es ist vorgesehen, bei der DIN 18015-1 den maximal zulässigen Spannungsfall auf 3,5 % zu erhöhen.

**Bild 10.2 – Spannungsfälle nach NAV, DIN 18015-1 und DIN VDE 0100-520**

- Fall B) Erfolgt die Versorgung durch ein kundeneigenes DC-Netz, einschließlich dezentraler Einspeisungen, Speicher, etc., wie z. B. in der Industrie oder bei Rechenzentren, so sollte der maximale Spannungsfall analog zu DIN VDE 0100-520, Beiblatt 2, den Wert von 8 % in einer Spannungsebene nicht übersteigen. Die Aufteilung der einzelnen Spannungsfälle über mehrere Verteiler bis zum Verbraucher muss im Rahmen einer Fachplanung koordiniert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass im Normalbetrieb das untere Spannungsband (siehe z. B. Abschnitt 5.2 in diesem Leitfa- den) nicht unterschritten wird. Gegebenenfalls muss der maximale Spannungsfall verringert werden oder die Nennspannung angepasst werden.

**ANMERKUNG:** Der maximale Spannungsfall ergibt sich aus der Differenz zwischen einer Einspeisung bzw. Quelle mit dem höchsten Spannungsniveau bis zu dem Verbraucher mit dem kleinsten Spannungsniveau.



**Bild 10.3 – Spannungsfall in Anlehnung an DIN VDE 0100-520, Beiblatt 2**

**ANMERKUNG:** DC/DC-Konverter zu einer weiteren Spannungsebene mit Verbrauchern stellen selbst einen Verbraucher dar.

Der rechnerische Nachweis des Spannungsfalls erfolgt mit dem maximalen Betriebsstrom des Stromkreises bei der Betriebstemperatur des Kabels bzw. der Leitung. Im Falle des gleichen Querschnitts bei Hin- und Rückleiter gilt

$$\Delta U = 2 \cdot l \cdot I_B \cdot R'_L$$

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 \%$$

wobei

- $l$  Länge des Stromkreises
- $I_B$  Betriebsstrom
- $R'_L$  spezifischer Widerstand des Kabels bzw. Leitung

Für die Berücksichtigung der Resistanzerhöhung siehe Aufzählung 5 in Abschnitt 10.1.

Tabelle 10.3 und Tabelle 10.4 zeigen die maximale Kabellänge für Kabel bzw. Leitungen mit einer maximalen Leiterbetriebstemperatur von 70 °C bei 4 % Spannungsfall mit einer Nennspannung von 650 V.

**Tabelle 10.3 – Maximale Kabel- und Leitungslänge für Kabel und Leitungen der Klasse 1 und 2 nach DIN EN 60228 (VDE 0295) bei DC**

$I_B$ A	Maximal zulässige Kabel- und Leitungslänge $l_{max}$ in m bei $\Delta u = 4 \%$ , $U_n = 650$ VDC und Leiterbetriebstemperatur 70 °C															
	Leiterquerschnitt in mm <sup>2</sup>															
	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300
6	150	244	393	588												
10	90	147	236	353	594											
16	56	92	147	220	371	590										
20	45	73	118	176	297	472	747									
25		59	94	141	237	378	598									
32			74	110	186	295	467	648								
40			59	88	148	236	374	518	702							
50				71	119	189	299	415	561							
63					94	150	237	329	446	644						
80						118	187	259	351	507	704					
100						94	149	207	281	405	563	710				
125							120	166	225	324	450	568	701			
160								130	175	253	352	444	548	685		
200									140	203	281	355	438	548	720	
250										162	225	284	350	439	576	723
300											188	237	292	365	480	603
400													219	274	360	452
500															288	362

**Tabelle 10.4 – Maximale Kabel- und Leitungslänge für Kabel und Leitungen der Klasse 5 und 6 nach DIN EN 60228 (VDE 0295) bei DC**

$I_B$ A	Maximal zulässige Kabel- und Leitungslänge $l_{max}$ in m bei $\Delta u = 4\%$ , $U_n = 650$ VDC und Leiterbetriebstemperatur $70\text{ °C}$															
	Leiterquerschnitt in $mm^2$															
	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300
6	136	227	366	549												
10	82	136	219	329	569											
16	51	85	137	206	356	561										
20	41	68	110	165	284	449	696									
25		54	88	132	228	359	557									
32			69	103	178	281	435	613								
40			55	82	142	224	348	490	704							
50				66	114	180	279	392	563							
63					90	143	221	311	447	634						
80						112	174	245	352	499	659					
100						90	139	196	281	399	527	675				
125							111	157	225	320	422	540	674			
160								123	176	250	330	422	526	641		
200									141	200	264	337	421	513	678	
250										160	211	270	337	410	543	678
300											176	225	281	342	452	565
400													211	256	339	424
500															271	339

Eine Umrechnung der maximal zulässigen Kabel- und Leitungslänge auf andere Spannungsfälle erfolgt mit dem Faktor  $\frac{\Delta u}{4\%}$  bzw. bei anderen Nennspannungen mit dem Faktor  $\frac{U_n}{650\text{ V}}$ .

### 10.3 Berücksichtigung der Schleifeninduktivität bei Halbleiter-Leistungsschaltern

Beim Einsatz von Halbleiterleistungsschaltern ist zu beachten, dass diese nur eine begrenzte Energie beim Abschalten aufnehmen können. Deswegen muss die (zurückspeisende) Induktivität in der Fehlerschleife beachtet werden, um den Schalter nicht zu überlasten, siehe IEC 60947-10.

## 11 Erstprüfung von elektrischen Anlagen nach DIN VDE 0100-600

### 11.1 Besichtigung

Die Besichtigung von DC-Anlagen nach DIN VDE 0100-600 ist ohne Einschränkungen anwendbar.

### 11.2 Erproben und Messen

Prüfungen von DC-Installationen können wie folgt durchgeführt werden:

Sofern zutreffend, müssen die folgenden Prüfungen auch an DC-Installationen durchgeführt werden, vorzugsweise in der folgenden Reihenfolge:

- a) Durchgängigkeit der Leiter insbesondere der Schutzleiter  
anwendbar ohne Einschränkungen
- b) Isolationswiderstand  
anwendbar ohne Einschränkungen

- c) Isolationswiderstand zur Bestätigung der Wirksamkeit des Schutzes durch SELV, PELV oder durch Schutztrennung  
anwendbar ohne Einschränkungen
- d) Isolationswiderstand/-impedanz von isolierenden Fußböden und isolierenden Wänden  
anwendbar ohne Einschränkungen
- e) Prüfung der Spannungspolarität  
anwendbar ohne Einschränkungen
- f) Prüfung zur Bestätigung der Wirksamkeit des Schutzes durch automatische Abschaltung der Stromversorgung

Durch die Regelung in den leistungselektronischen DC-Quellen wird die Schleifenfehlerimpedanzmessung beeinflusst. Dadurch können übliche AC-Messgeräte bei diesen Quellen nicht eingesetzt werden (siehe hierzu 10.1).

Alternativ zu kann auch die Durchgängigkeit der Leiter geprüft und die Schleifenfehlerimpedanz berechnet werden.

Hinweis: Bei der Berechnung der Fehlerschleifenimpedanz müssen auch die Kenndaten der DC-Quellen und alle betrieblichen Kombinationen von einspeisenden Quellen berücksichtigt werden. Oftmals ist der Inselnetzbetrieb der mit der kleinsten Kurzschlussleistung.

Hinweise der DKE:

**Verlautbarung zu „Prüfen des Schutzes gegen elektrischen Schlag bei Einsatz von USV-Anlagen und Frequenzumrichtern“**

<https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/core-safety/normenhinweise/frequenzumrichter-und-usv-anlagen>

**Verlautbarung der Gremien DKE/K 226 „Ausrüstung von Starkstromgeräten und -anlagen mit elektronischen Betriebsmitteln“ mit DKE/K 225 „Elektrotechnische Ausrüstung und Sicherheit von Maschinen und maschinellen Anlagen“ und DKE/UK 221.1 „Schutz gegen elektrischen Schlag“**

<https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/industry/normenhinweise/schutzmassnahme-bei-einsatz-von-leistungsantriebssystemen>

Ø LINK (Querverweis) aus <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/core-safety/normenhinweise/frequenzumrichter-und-usv-anlagen> auf die neue K 226-Verlautbarung

Prüfen des Schutzes gegen elektrischen Schlag bei Einsatz von Frequenzumrichtern und USV-Anlagen

Hinweis des DKE/UK 221.1 „Schutz gegen elektrischen Schlag“

- g) Prüfung zur Bestätigung der Wirksamkeit des zusätzlichen Schutzes  
anwendbar ohne Einschränkungen
- h) Prüfung der Phasenfolge der Außenleiter  
nicht anwendbar
- i) Funktionsprüfungen  
anwendbar ohne Einschränkungen
- j) Spannungsfall  
Rechnerischer Nachweis bzw. Nutzen von Tabellen mit Grenzlängen siehe 10.2.

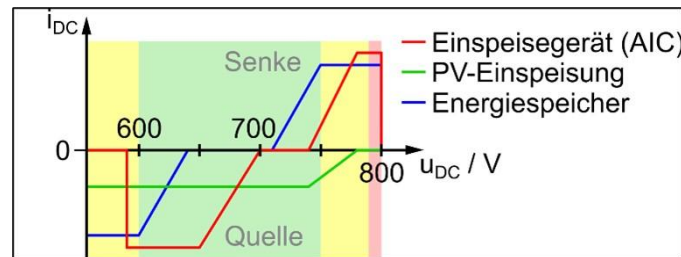
### 11.3 Prüfprotokolle

Es gibt keine DC-spezifischen Normen. Mindestanforderungen an den Inhalt der Protokolle sind in DIN VDE 0105-100 und DIN VDE 0100-600 aufgeführt.

## 12 Funktionale Aspekte

### 12.1 Regelkennlinien (droop curves)

Regelkennlinien [11] sorgen für das Leistungsgleichgewicht im DC-Netz durch Messung der Spannung und Anpassung der Stromaufnahme oder -abgabe der aktiven Geräte (z. B. DC/DC-Wandler). Um z. B. den Parallelbetrieb von Versorgungsgeräten und Speichern zu gewährleisten, wird das Konzept der kennlinienbasierten Regelung verwendet. Dies ist ein einfaches Verfahren, um die Leistungsflüsse zu steuern. Alle aktiven Geräte sind dabei stromgeregelt und der Sollwert des Stroms wird mit einer Kennlinie aus der aktuellen, an den Klemmen des Geräts gemessenen DC-Netzspannung  $u_{DC}$  bestimmt. In Bild 12.1 sind beispielhafte Kennlinien von drei Geräten im Parallelbetrieb dargestellt. Für die Größen  $u_{DC}$  und  $i_{DC}$  gilt das Verbraucher-Zählpeilsystem, das in Bild 12.2 dargestellt ist.



**Bild 12.1 – Beispielhafte Regelkennlinien verschiedener Netzteilnehmer mit aktiver Leistungsregelung**

Das Einspeisegerät (AC/DC-Wandler als Active Infeed Converter/AIC; rote Regelkennlinie in Bild 12.1) kann nur dann Energie ins DC-Netz einspeisen, wenn die DC-Spannung höher ist als der Gleichrichtwert der anliegenden AC-Netzspannung. In Bild 12.1 wird von einem 400 V AC-Netz ausgegangen, sodass der Versorger ab  $u_{DC} \geq 565$  V mit voller Leistung arbeitet. Bei höherer DC-Spannung verringert er seinen Einspeisestrom bis auf 0 A, um schließlich ab ca. 750 V (Spannung  $U_3$ , siehe Abschnitt 5.2 und Bild 5.2) ins AC-Netz zurückzuspeisen.

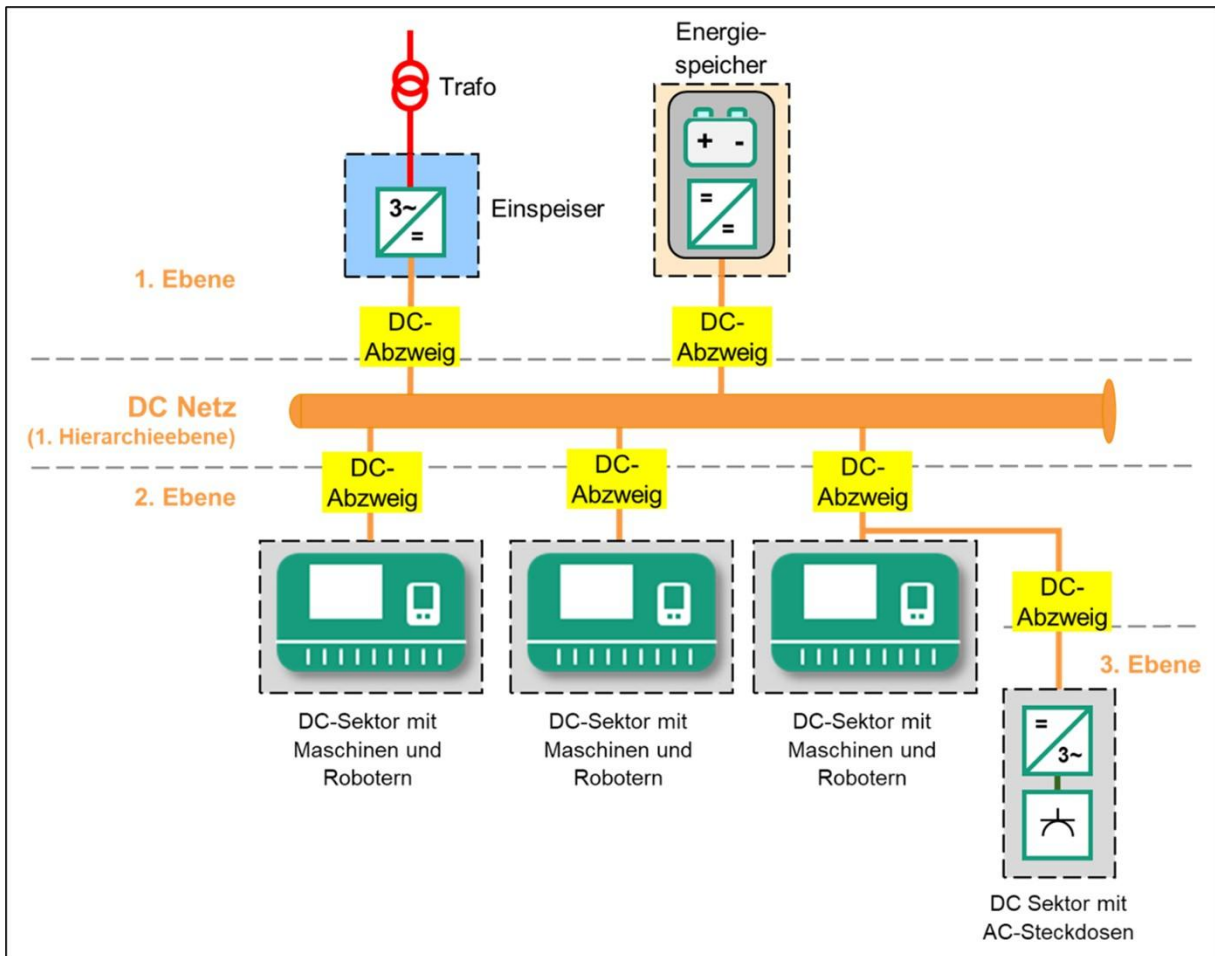
Der Energiespeicher (Energiespeicher mit Wandler; blaue Regelkennlinie) ist im mittleren Spannungsbereich des DC-Netzes inaktiv. Beim Absinken der DC-Spannung gibt er Energie ins DC-Netz ab, während er bei zu hoher DC-Spannung dem Anstieg entgegenwirkt, indem er Energie aufnimmt.

Die PV-Einspeisung (Solaranlage über DC/DC-Wandler; grüne Regelkennlinie) kann ausschließlich Energie ins DC-Netz einspeisen. Das erfolgt nahezu im gesamten Regelbereich des DC-Netzes. Nur wenn die DC-Spannung in den oberen Bereich des nominalen Bandes B3 (Abschnitt 5.2) kommt, muss diese Einspeisung abgeregelt werden, damit der Maximalwert  $U_4 = 800$  V (Bild 5.2) im DC-Netz nicht überschritten wird.

### 12.2 Vorladung von Geräten im DC-Netz

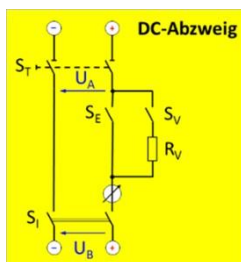
Geräte im DC-Netz verfügen üblicherweise über eingangsseitige Kondensatoren. Beim Einschalten ungeladener Kapazitäten fließen im DC-Netz sehr hohe Einschaltströme, die ohne weitere Maßnahmen zum Auslösen der Schutzorgane führen würden. Daher ist jeweils beim Einschalten sicherzustellen, dass der Einschaltstrom auf einen Wert begrenzt wird, der nicht zum Auslösen der Schutzorgane führt. In diesem Kapitel wird exemplarisch die Reduzierung des Einschaltstroms durch Widerstände beschrieben, die konkreten Dimensionierungsregeln sind in [11] zu finden.

Die Vorladung erfolgt sequenziell in mehreren Ebenen. Zuerst wird die 1. Ebene vorgeladen – im Regelfall sind dies die Einspeisegeräte und ggf. Speicher – anschließend erfolgt zeitversetzt die Vorladung unterlagerter Ebenen. In Bild 12.2 ist das Netz mit den Ebenen vereinfacht dargestellt. Das gestaffelte Vorladen soll maximal 10 Sekunden pro Ebene benötigen.

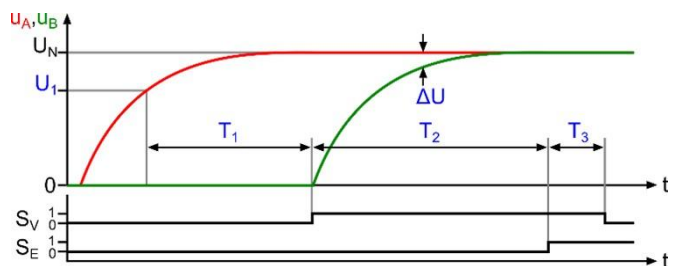


**Bild 12.2 – Übersicht über die Vorladeebenen**

Das grundsätzliche Prinzip der sequenziellen Vorladung ist in Bild 12.3 dargestellt. Der Anschluss A des DC-Abzweigs mit der Spannung  $U_A$  ist mit der überlagerten Hierarchieebene, der Anschluss B (Spannung  $U_B$ ) mit der unterlagerten Hierarchieebene verbunden. Der Vorladeprozess wird durch die Spannung der vorgelagerten Hierarchieebene angestoßen (in Bild 12.3 b) rot dargestellt, gemessen an Anschluss A). Erreicht diese Spannung den Wert  $U_1$ , dann beginnt die Wartezeit  $T_1$ .



a) DC-Abzweig mit Vorladung über Widerstand



b) Spannungen an den Anschlüssen des DC-Abzweigs

**Bild 12.3 – Sequenzielle Vorladung**

Nach  $T_1$  startet die Vorladung (grüner Spannungsverlauf) der unterlagerten Hierarchieebene durch Schließen von  $S_V$ . Die Geräte am Anschluss B werden über  $R_V$  auf die Spannung am Anschluss A geladen. Wenn die Differenzspannung  $\Delta U$  einen vorgegebenen Wert unterschritten hat, wird  $S_E$  eingeschaltet und  $R_V$  überbrückt. Nun ist die Vorladung abgeschlossen. Die sich beim Ladevorgang ergebende Zeitkonstante muss dabei deutlich kleiner sein als  $T_2$ . Nach Ablauf von  $T_3$  wird  $S_V$  geöffnet. Sollten weitere Hierarchieebenen folgen, so wird für den nächsten DC-Abzweig die in Bild 12.3 grün dargestellte Spannung an Anschluss B zur neuen roten Spannung am neuen Anschluss A.

Als Parameter werden folgende Werte vorgeschlagen:

- Spannungsuntergrenze für Start der Vorladung:  $U_1 = 520 \text{ V}$ ,
- Differenzspannung am Ende der Vorladung:  $\Delta U = 15 \text{ V}$ ,
- Wartezeit für Start der Vorladung durch DC-Abzweig:  $T_1 = 5 \text{ s}$ ,
- Dauer der Vorladung:  $T_2 \leq 4 \text{ s}$ ,
- Abschalten Vorladung:  $T_3 = 1 \text{ s}$ .

Als Randbedingung muss  $T_1 > T_2 + T_3$  gelten, damit nachfolgende Ebenen erst mit ihrer Vorladung beginnen, wenn die vorausgehende Ebene ihre Vorladung abgeschlossen hat. Die Zeit  $T_l$  ergibt sich aus der Zeitkonstante  $\tau$  der Vorladung. Nach der Zeit  $5 \cdot \tau$  kann diese als vollständig geladen betrachtet werden. Daher muss  $T_1 > 5 \cdot \tau$  gelten.

## Anhang A

# Forschungsaktivitäten zum elektrischen Schlag Gefährdung durch DC-Körperdurchströmung

Das Forschungsprojekt „Kermit-DC“ (Projekt in Österreich durch die Nationale Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert. Projektende 2022) behandelte folgende Fragestellungen:

- a) Flimmerschwellen bei Gleichstrom
- b) Einfluss des Einschalt-, sowie des Abschaltverhaltens eines DC-Fehlerstromes
  - Hier wurde ein derzeit noch nicht beachteter Aspekt nachgewiesen. Es wurde Kammerflimmern durch den Abschaltvorgang an sich und nicht durch den Gleichfehlerstrompegel erzeugt.
- c) Polaritäts-(Richtungsabhängigkeit)-abhängigkeit der Flimmerschwelle

Hierzu wurden in-vitro-Experimente an 100 Kaninchenherzen im Working-Heart-System durchgeführt. Weiter wurden die DC-Flimmerschwellen auch ins Verhältnis zu AC(50 Hz)-Flimmerschwellen gesetzt. Die ermittelten Werte am Kaninchen-Herzen wurden anschließend auf das menschliche Herz übertragen und mittels FEM/FDTD-Simulationen von der reinen Situation am Herzen auf ein Ganzkörpermodell hochgerechnet. Darüber hinaus wurde der mathematischen Modellbildung strominduzierter elektrophysiologischer Vorgänge am Herzen großer Raum gegeben. Ziel war es neben dem, grundlegendes Verständnis dieser Vorgänge zu erzielen auch Experimente an schlagenden Herzen in der Zukunft zu reduzieren oder sogar zu vermeiden.

In den DIN-Mitteilungen 05/2024 „Kermit-DC – Forschung fürs Leben“ werden die Ergebnisse beschrieben. [23]

### Gefährdungen in nassen Umgebungen bei AC und bei DC (inklusive Badewannenunfälle)

- „WECO Protection“ Projekt in Österreich durch die Nationale Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert. Laufzeit bis 2025. Das Projekt „WECO Protection“ verfolgt das Ziel der wissenschaftlichen Evaluierung von potenziellen Gefahrenquellen (Ladeinfrastruktur, Handytelefon mit defektem Ladegerät etc.) in nasser Umgebung sowie in Nassbereichen. Dabei werden anhand verschiedener Durchströmungsszenarien – abweichend von klassischen Durchströmungsszenarien z. B. Hand-Hand-Körperströme und Feldverteilungen durch Simulationen an einem anatomischen Modell ermittelt. Die aus der Simulation abgeleiteten Stromvektoren durch das Herz fließen in die Experimente am Working-Heart-Modell ein. Mittels der Versuche an isolierten Kaninchenherzen sollen die potenzielle Gefahr von z. B. Herzkammerflimmern und weiterer physiologischer Auswirkungen eines Stromschlages ermittelt werden und die Ergebnisse mit Skalierungsparameter vom isolierten Kaninchenherz auf das menschliche Herz umgerechnet werden. [23]

### Gefährdung durch pulsartige Körperdurchströmung – geplant

- „Kermit Puls“ Projekt in Österreich, Start ist vorgesehen für 2026. Neben den bekannten Forschungsarbeiten/Publicationen zu dem Thema wurde in den Forschungsprojekten Kermit-AC (10 Hz – 10 kHz) und Kermit-DC eine solide Basis zum Verständnis der Stromwirkungen auf das Herz gelegt. Moderne leistungselektronische Anlagen verwenden jedoch im Wesentlichen gepulste Formen des Gleichstromes. Daher soll in einem weiteren Forschungsprojekt („Kermit-Puls“) die Wirkung gepulster Gleichströme, Kondensatorentladungen sowie Frequenzgemische auf das Herz untersucht werden und so die Brücke zu realen, in der Praxis oft auftretenden Strömen geschlagen werden. Als Stimuli für das Herz sollen in Anlagen gemessene Ströme zur Anwendung kommen. In diesem Projekt soll ebenfalls von in-vitro-Experimenten am schlagenden Herzen ausgehend der Weg zum Elektrounfall am Ganzkörpermodell gespannt werden. Auch in diesem Projekt sollen mittels mathematischer und theoretischer Betrachtungen weitere Möglichkeiten geschaffen werden, ein tieferes Verständnis der physiologischen Vorgänge an Menschen zu erlangen.

### Relevante Publikationen in Zusammenhang mit DC-Leitfragen

- International Journal of Biomedical Science and Engineering: An In-vitro Method for Current Induced Ventricular Fibrillations. M. Koch, J. Silny, B. Podesser, 2022; 10(1): 1-11: doi: 10.11648/j.ijbse.20221001.11, ISSN: 2376-7227 (Print); ISSN: 2376-7235 (Online)

- Basic Res Cardiol. 1982 May-Jun;77(3):237-49: Influence of direct current on the electrical activity of the heart and on its susceptibility to ventricular fibrillation, S. Hohnloser, J. Weirich, H. Antoni PMID: 6180727 DOI: 10.1007/BF01908039
- Stiftung Elektroschutz ESF-Bericht Nr. 6E. A new approach to protection against harmful electric shock based on tolerable risks and fault protection by automatic dis-connection of supply for a.c. 50/60 Hz and for d.c. H. Bachl, G. Biegelmeier, R. Hirtler and A. Mörx, (2008)

Die erforderliche wissenschaftliche Basis für die Anpassung der konventionellen Zeit/Stromstärke-Bereiche in IEC 60479-2 ist noch nicht verfügbar. Die in IEC 60479-1 definierten Zeit/Stromstärke-Bereich sind daher als aktueller Stand – auch für DC-Anwendungen – heranzuziehen.

In eine mögliche Anpassung der konventionellen Zeit/Stromstärke-Bereiche müssen auch die Auswirkungen neuer Fehlerszenarien einfließen: Dabei müssen z. B. großflächige Berührungsflächen, von üblichen Durchströmungswegen abweichende Durchströmungswege wie z. B. Durchströmung vom Rücken zur Brust sowie erschwerte Umgebungsbedingungen (regennass, verschwitzt etc.) in die Betrachtung einbezogen werden.

Der in IEC-Gremien diskutierte, ladungsbasierte Grenzwert (3 mC) für Durchströmungsdauern < 1 ms kann derzeit nur unter dem Blickwinkel einer Arbeitshypothese für Gefährdungsbewertungen herangezogen werden.

## Literaturhinweise

- [1] Alexander Sauer: „Die Gleichstromfabrik“, Carl Hanser Verlag, München, 2020, ISBN 978-3-446-46581 7
- [2] DIN VDE 0100-100:2009-06: „Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 1: Allgemeine Grundsätze, Bestimmungen allgemeiner Merkmale, Begriffe“, DIN Deutsches Institut für Normung e. V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
- [3] DC-INDUSTRIE und ZVEI: „Gleichstrom für die nachhaltige Fabrik“, Positionspapier, [https://dc-industrie.zvei.org/fileadmin/user\\_upload/Presse\\_und\\_Medien/Publikationen/2020/November/DC-INDUSTRIE-Gleichstrom-fuer-die-nachhaltige-Fabrik-final.pdf](https://dc-industrie.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2020/November/DC-INDUSTRIE-Gleichstrom-fuer-die-nachhaltige-Fabrik-final.pdf), abgerufen 02. Sep. 2024.
- [4] IEC Technical report TR 63282 Ed. 2 2023-02: „LVDC systems – Assessment of standard voltages and power quality requirements“, TC 8 / JWG 9.
- [5] Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft (Hrsg.): „Auswahl von Schutzeinrichtungen für den Brandschutz in elektrischen Anlagen“, VdS Schadenverhütung GmbH, Köln, 2015, <https://shop.vds.de/de/download/7aa8c40426b4be45aeb0e3d7c7db1500/>.
- [6] Karsten Fuchs, Frank Berger, et. al.: „Thermal electrical aging of selected polymeric LVAC cables under DC voltage stress“, Proc. 10th International Conference on Insulated Power Cables (JICABLE), Paris-Versailles/Frankreich, 2019.
- [7] VDE (Hrsg.): „Gleichstrom im Niederspannungsbereich, Deutsche Normungs-Roadmap“, <https://www.dke.de/resource/blob/1773296/0900313b53deb424e44e9cdf844cb8fa/deutsche-normungs-roadmap-gleichstrom-im-niederspannungsbereich-version-2-0-data.pdf>, 2018.
- [8] Kenan Askan, Michael Bartonek, Klaus Sobe: „Design and Development of an Integrated Power Module Used in Low Voltage DC/AC Hybrid Circuit Breaker“, In: Proceedings of PCIM Europe 2018 (International Exhibition & Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management), p. 281ff. 5. – 7. Juni 2018, Nürnberg.
- [9] Hartwig Stammberger, Hendrik Köpf: „DC-Netz schützen und sicher schalten“. Konferenz DC2019, Lemgo, TH OWL, 10. Sep. 2019.
- [10] M. Maerz, B. Wunder, I. Ott: „LVDC-Netze – Herausforderungen und Perspektiven“. 7. ETG-Fachtagung der Leistungselektronik und ihre Anwendungen, Bad Nauheim, April 2017
- [11] DC-INDUSTRIE2 [Herausgeber]: „Systemkonzept DC-INDUSTRIE“, verfügbar seit April 2022 auf <https://odca.zvei.org/resources/publications/updated-system-description-for-dc-industrie2>, abgerufen 14. Jan. 2026. Auch verfügbar als VDE SPEC 90037 (<https://www.vde.com/en/working-areas/standards/spec/vde-spec-publications>, abgerufen am 14. Jan. 2026).
- [12] ETSI 300132 3 1 v2.1.13 (1) (2011): „Environmental Engineering (EE); Power supply interface at the input to telecommunications and datacom (ICT) equipment; Part 3: Operated by rectified current source, alternating current source or direct current source up to 400 V; Sub-part 1: Direct current source up to 400 V“, [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/300100\\_300199/3001320301/02.01.01\\_40/en\\_3001320301v020101o.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300100_300199/3001320301/02.01.01_40/en_3001320301v020101o.pdf)
- [13] DIN EN 50162:2005-05 (auch DIN VDE 0150:2005-05): „Schutz gegen Korrosion durch Streuströme aus Gleichstromanlagen“ Englischer Titel: „Protection against corrosion by stray current from direct current systems“
- [14] Forschungsprojekt IsKoNeu „Isolationskoordination: Bemessung von Luft- und Kriechstrecken unter Umgebungsgesichtspunkten in neuen Anwendungen“, Abschlussbericht unter <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/components-technologies/iskoneu>, abgerufen 16. Feb. 2022.
- [15] IEC 60479-1:2018-12: Effects of currents on human beings and livestock – Part 1: General aspects
- [16] IEC 60479-2:2019-05: Effects of currents on human beings and livestock – Part 2: Special aspects
- [17] IEC 60364-4-41:2005 + AMD1:2017 CSV: Low-voltage electrical installations – Part 4-41: Protection for safety – Protection against electric shock

- [18] M. Koch, J. Silny, B. Podesser, 2022, International Journal of Biomedical Science and Engineering: An In-vitro Method for Current Induced Ventricular Fibrillations. 10(1): 1-11: doi: 10.11648/j.ijbse.20221001.11, ISSN: 2376-7227 (Print); ISSN: 2376-7235 (Online)
- [19] Basic Res Cardiol. 1982 May-Jun;77(3):237-49: Influence of direct current on the electrical activity of the heart and on its susceptibility to ventricular fibrillation , S. Hohnloser, J. Weirich, H. Antoni PMID: 6180727 DOI: 10.1007/BF01908039
- [20] Stiftung Elektroschutz ESF-Bericht Nr. 6E. A new approach to protection against harmful electric shock based on tolerable risks and fault protection by automatic disconnection of supply for a.c. 50/60 Hz and for d.c. H. Bachl, G. Biegelmeier, R. Hirtler and A. Mörx, (2008)
- [21] Dosimetry for Ventricular Fibrillation Risk with Short Electrical Pulses: History and Future. M. Kroll, D. Panescu, R. Hirtler, M. Koch, Ch. Andrews, Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc. 2019:1788-1794 doi: 10.1109/EMBC.2019.8857787]
- [22] Dalziel CF. Electric fences-their hazards, types, regulations, and safe application. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1950; 69:8-15.
- [23] Michael Koch: „Kermit-DC - Forschung fürs Leben“, DIN-Mitteilungen 05/2024
- [24] Bessei, Herbert: „Sicherheitshandbuch“, Herausgeber: NH/HH-Recycling e.V.; Kerschensteiner Verlag; 2015; ISBN: 978-3-931954-85-7.
- [25] IEC 60269-1: „Low-voltage fuses – Part 1 general requirements“
- [26] IEC 60269-1: „Low-voltage fuses - Part 6: Supplementary requirements for fuse-links for the protection of solar photovoltaic energy systems“
- [27] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung DGUV, Information 203-072: „Wiederkehrende Prüfungen elektrischer Anlagen und ortsfester Betriebsmittel“, April 2021, <https://publikationen.dguv.de/regelwerk/dguv-informationen/2879/wiederkehrende-pruefungen-elektrischer-anlagen-und-ortsfester-betriebsmittel-fachwissen-fuer-pruefper>, abgerufen am 16. Juli 2021
- [28] <https://www.bgetem.de/arbeits-sicherheit-gesundheitsschutz/institute/institut-zur-erforschung-elektrischer-unfaelle/statistik-der-stromunfaelle>
- [29] Andrea Mariscotti: „Stray Current Protection and Monitoring Systems: Characteristic Quantities, Assessment of Performance and Verification“, Article in Sensors, DOI: 10.3390/s20226610, [https://www.researchgate.net/publication/346004445\\_Stray\\_Current\\_Protection\\_and\\_Monitoring\\_Systems\\_Characteristic\\_Quantities\\_Assessment\\_of\\_Performance\\_and\\_Verification](https://www.researchgate.net/publication/346004445_Stray_Current_Protection_and_Monitoring_Systems_Characteristic_Quantities_Assessment_of_Performance_and_Verification), Nov. 2020.
- [30] Klemens Heumann: „Grundlagen der Leistungselektronik“, 6. Auflage, Teubner, Stuttgart 1996.
- [31] Open Compute Project Foundation, <https://www.opencompute.org/projects/power-distribution>, abgerufen am 14. Feb. 2026.

VDE Verband der Elektrotechnik  
Elektronik Informationstechnik e.V.

Merianstraße 28  
63069 Offenbach am Main  
Tel. +49 69 6308-0  
[service@vde.com](mailto:service@vde.com)  
[www.vde.com](http://www.vde.com)

**VDE**