



Gleichstrom im Niederspannungsbereich

Deutsche Normungs-Roadmap
Version 2

Bildnachweis Titelseite: mirkograul/stock.adobe.com

Herausgeber

VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e. V.

als Träger der

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE
E-Mail: dke@vde.com
Internet: www.dke.de

Stresemannallee 15
60596 Frankfurt
Telefon: +49 69 6308-0
Telefax: +49 69 6308-9863

Stand: August 2018

INHALTSVERZEICHNIS

	Inhaltsverzeichnis	3
1	VORBEMERKUNG	8
1.1	Einführung und Hintergrund	9
1.2	Mehrwert durch Normen	10
1.3	Motivation und Handlungsbedarf im Bereich LVDC	11
1.3.1	AC-Vorteile gegenüber DC	11
1.3.2	DC-Vorteile gegenüber AC	11
1.3.3	Umwandelungsprozesse in AC und DC	12
2	BEGRIFFSDEFINITIONEN	14
2.1	Low Voltage Direct Current	14
2.2	Konformität	14
2.3	Interoperabilität	14
2.4	Kompatibilität	14
2.5	Use Case und User Story	15
3	NORMUNG UND STANDARDISIERUNG	16
3.1	Normung	16
3.2	Standardisierung	17
3.3	Struktur der Normungs- und Standardisierungslandschaft	18
3.3.1	DIN, CEN und ISO	19
3.3.2	DKE, CENELEC und IEC	19
3.3.3	IEEE USA	20
3.4	Nationale und internationale Aktivitäten	21
3.5	Deutsche Normungs-Roadmaps	21
3.5.1	Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität 2020.	21
3.5.2	Normungs-Roadmap E Energy/Smart-Grids Version 2.0	23
3.5.3	Normungs-Roadmap Smart Home + Building Version 2.0.	24
3.5.4	Normungs-Roadmap AAL (Active Assisted Living) Version 2.0	25
3.5.5	Normungs-Roadmap Energiespeicher	26

4	WIRTSCHAFTLICHE UND RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN	27
4.1	Markt	27
4.1.1	LVDC als Lösungsbeitrag für gesellschaftliche Herausforderungen	27
4.1.2	Die Vielfalt der Branchen und Domänen im LVDC-Markt.	27
4.2	Gesetzliche Rahmenbedingungen und Festlegungen	29
4.2.1	Energiewirtschaftsgesetz – EnWG.	29
4.2.2	Niederspannungsanschlussverordnung (NAV)	29
4.2.3	Niederspannungs-Richtlinie (LVD)	29
4.2.4	EMV-Richtlinie.	30
4.3	Arbeitsschutz (Sicherheitsanforderungen, Dokumentation)	30
4.4	Versicherungswirtschaft	30
5	SCHUTZZIELE UND SCHUTZKONZEPTE	32
5.1	Sicherheitsbegriff	32
5.2	Personengefährdung durch Gleichstrom und Schutz gegen elektrischen Schlag	32
5.2.1	Einführung.	32
5.2.2	Wirkungen elektrischer Gleichströme auf den Menschen	33
5.2.3	Ergebnisse des Projektes DC-Sich und weiterer Forschungsbedarf	35
5.3	Schutz bei Überstrom	36
5.4	Schutz bei Überspannung.	36
5.5	Funktionale Sicherheit auf Systemebene	37
5.5.1	Was versteht man unter „Funktionaler Sicherheit“	37
5.5.2	Das System Elektroinstallation.	38
5.5.3	Normative Verweisungen	38
5.5.4	Begriffe aus der DIN EN 61140 (VDE 0140-1)	39
5.5.5	Zusätzlicher Schutz nach DIN EN 61140 (VDE 0140-1) sowie DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410)	40
5.5.6	Funktionale Sicherheit der Elektroinstallation	41
5.5.7	Abschätzung der funktionalen Sicherheit auf Basis der DIN EN 50495 (VDE 0170-18) für Schutzschaltgeräte bzw. in Betriebsmittel integrierte Schutzfunktion.	42
5.6	Störlichtbögen.	43
5.6.1	Allgemeines	43
5.6.2	Störlichtbogenschutzsysteme in Energie-Schaltgerätekombinationen (PSC-Schaltgerätekombinationen)	44
5.6.3	Personengefährdung durch Störlichtbögen und Schutz gegen die thermischen Wirkungen	44
5.6.4	Fehlerlichtbögen in Niederspannungsanlagen	46
5.6.5	Lichtbögen in Elektroinstallationen.	47

5.7	Prüfung und Betrieb	.47
5.8	Trennen und Schalten	.48
5.8.1	Allgemein	.48
5.8.2	Halbleiterbauelemente.	.48
5.8.3	Steckverbinder und Steckvorrichtungen.	.48
5.8.4	Verpolungsschutz	.49
5.8.5	Stecker und Steckdosen	.50
5.8.6	Gleichspannungs-Steckvorrichtungen in Rechenzentren und Vermittlungsstellen	.51
5.8.7	Vorrichtungen für den Anschluss von Leuchten	.52
5.9	Schutz vor Restspannungen und Rückspannungen (Heckler)	.52
5.10	Automatisches Wiedereinschalten.	.53
5.11	Anwendung der fünf Sicherheitsregeln der Elektrotechnik	.53
5.11.1	Allgemein	.53
5.11.2	Die fünf Sicherheitsregeln	.54
5.11.3	Freischalten (Regel 1)	.55
5.11.4	Gegen Wiedereinschalten sichern (Regel 2)	.57
5.11.5	Spannungsfreiheit feststellen (Regel 3)	.58
5.11.6	Erden und kurzschließen (Regel 4).	.60
5.11.7	Benachbarte, unter Spannung stehende Teile abdecken und abschränken (Regel 5)	.60
5.11.8	Normen und Regelwerke	.61
6	BASISELEMENTE FÜR SICHERHEIT UND BETRIEB	.62
6.1	Basisschutz	.62
6.2	Fehlerschutz	.62
6.3	Zusatzschutz (z. B. direktes Berühren) mit gleichem Niveau zu AC nur bis 200 V DC gegen Erde	.63
6.4	Brandschutz und Sachschutz	.63
6.5	Schutz gegen thermische Einflüsse	.64
6.6	Korrosionsschutz	.65
6.7	Blitz- und Überspannungsschutz	.69
6.8	Abschaltbedingungen	.73
6.9	Isulationskoordination	.73

6.10	Gerätekoordination/Selektivschutz/Backup-Schutz	.73
6.11	Kennzeichnung von Anlagen und Betriebsmitteln	.73
6.12	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	.74
6.12.1	Wechselwirkung EMV-Filter und Isolationsüberwachungseinrichtungen	.79
6.12.2	Interoperabilität/gegenseitige Beeinflussungen	.79
6.12.3	Interoperabilität in Gleichspannungsnetzen	.84
6.12.4	EMV-Filter und Schutzmaßnahmen	.85
7	TECHNOLOGIEN	.86
7.1	Topologie/Architektur LVDC	.86
7.1.1	Systemdefinition.	.86
7.1.1.1	Netztopologien	.86
7.1.1.2	Qualitative Anforderungen (Stabilität, Lastanforderungen, Ripple, Redundanz/Verfügbarkeit)	.86
7.1.2	Systemabgrenzung	.87
7.1.2.1	DC/DC (intern)	.87
7.1.2.2	DC/AC bzw. AC/DC.	.87
7.1.2.3	Schnittstellen zu Lasten, Speichern, Quellen	.87
7.1.3	Netz und Erdungssysteme	.88
7.2	Spannungsebenen (-klassen)	.88
7.3	LVDC-Erzeugung am Beispiel der Photovoltaik	.89
7.4	Sonstige Betriebsmittel und Komponenten	.92
7.4.1	Kabel und Leitungen	.92
7.4.2	Kompatibilität der Geräte für AC/DC testen und dokumentieren.	.95
8	REGELUNG UND KOORDINATION	.96
8.1	Verweis Smart-Grid	.96
8.2	Regelungskonzepte (Lastflussmanagement, Energiemanagement)	.96
8.3	Systemrelevante Kommunikation	.97
8.4	Weiterführender Kommunikationsbedarf und Möglichkeiten	.98
9	ANWENDUNGSFELDER.	.99
9.1	Beleuchtungssysteme.	.99

9.1.1	Einleitung	.99
9.1.2	Beleuchtungssysteme mit DC-Schutzkleinspannungen	.99
9.1.3	Beleuchtungssysteme mit DC-Niederspannung	100
9.1.4	EMC-Standards	101
9.2	Inselsysteme (Micro-Grid)	102
9.3	Energiezugangsnetze (Globaler Süden)	103
9.4	Mobility/DC-gekoppelte Ladestation	106
9.5	Photovoltaik (PV)	107
9.6	Telekommunikationsbetriebsstellen	108
9.7	Rechenzentren	109
9.7.1	Normung/Planung/Sicherheit	110
9.7.2	Kabel/Kabelbezeichnung	112
9.7.3	Steckverbinder/Steckzyklen	112
9.8	Power-over-Ethernet (PoE)	112
9.8.1	PoE - Power Negotiation	113
9.8.2	Verkabelung für PoE-Systeme.	113
9.8.3	Steckverbinder für PoE-Systeme	114
10	PROJEKTE UND FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN.	115
10.1	DCSich – Auswirkung von Gleichstrom (DC) auf den menschlichen Körper im Rahmen der Elektromobilität und versorgender DC-Infrastruktur	116
10.2	IsKoNeu.	116
10.3	Forschungscampus Flexible Elektrische Netze FEN/RWTH Aachen	117
10.4	Das erste kommerziell genutzte 380 V Gleichstromnetz in Deutschland	118
10.5	DC-Industrie.	119
10.6	DC-Schutzorgane – Entwicklung eines neuen, integrierten Schutzkonzepts und neuer Schutzorgane für zukünftige Niederspannungs-Gleichstromnetze	119
11	Abkürzungsverzeichnis	121
	Literaturhinweise	124

1 VORBEMERKUNG

Neue und innovative Anwendungen im Bereich der Energieversorgung und Elektromobilität bedingen neue Lösungen für den Einsatz von Gleichstromsystemen. Dies gilt auch für die Gebäudeinstallationen, bei denen neben dem Wechselspannungsnetz auch eine Gleichstrominfrastruktur denkbar ist, um beispielsweise Verluste in Einzelnetzteilen abzusenken. Und genau hier soll die Deutsche Normungs-Roadmap ansetzen: In enger Zusammenarbeit wurde ein Dokument verfasst, dass sowohl den Stand der Technik, als auch Handlungsempfehlungen und Anforderungen zusammenführt.

Die Normungs-Roadmap behandelt im Wesentlichen vier Hauptgruppen. Im Anschluss an wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen befasst sie sich mit der Sicherheit, Schutzkonzepten und Netzstrukturen. Weiterhin wird näher auf Anlagentopologien und Use Cases eingegangen, bevor ein Kapitel über Betriebsmittel und Komponenten das Dokument inhaltlich abrundet.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse bei den Arbeiten dieser Roadmap sind die Gremien aufgefordert, zu prüfen, ob ihre Normen das Thema Low-Voltage-Direct-Current (LVDC) bereits hinreichend abdecken, und festgestellte Lücken zeitnah zu schließen.

Gleichstrom wird in vielen Bereichen zunehmend eingesetzt, wo bisher klassisch Wechselstrom zum Einsatz kommt. Als Beispiele sind hier Beleuchtungsanlagen, Rechenzentren und Industrieanwendungen zu nennen. Die Spannungsebenen sind dabei völlig unterschiedlich und bewegen sich in den zuvor genannten Beispielen zwischen 48...380...750 V DC.

In vielen privatwirtschaftlichen oder auch öffentlich geförderten Projekten wird das Verhalten von DC-Micro-Grids untersucht und ausgewertet. Als Beispiel sind hier die Projekte DC-Industrie und DC-Schutzorgane zu nennen. Derartige Projekte orientieren sich ausschließlich an normativen Vorgaben und berücksichtigen Handlungsempfehlungen der nationalen und internationalen Normungsgremien.

Parallel dazu sind aber auch Tendenzen am Markt zu erkennen, dass bei Gleichstrominstallationen Sicherheitskonzepte teilweise komplett vernachlässigt oder eigene Sicherheitskonzepte entwickelt werden, welche keine normative Grundlage haben. Daher lautet die Empfehlung dieser deutschen Normungs-Roadmap zu planende DC-Systeme an normativen Grundlagen zur elektrotechnischen Sicherheit und des Brandschutzes auszurichten.

Ein weiterer Aspekt ist die Lebensdauer und die Nachhaltigkeit einer elektrotechnischen Installation. Speziell bei Installationen in halböffentlichen oder öffentlichen Gebäuden werden derzeit Gleichstrominstallationen ausgeführt, deren Sicherheits- und Steuerungskonzepte auf intelligenten Controllern basieren. Als Beispiele sind hier Power over Ethernet (PoE) oder auch parallele Bus Systeme zu nennen. Letztere führen parallel zu den Daten- und Steuerleitungen zusätzlich Leitungen zur Energieübertragung mit. Der Energiefluss wird in diesem Fall erst freigeschaltet, wenn ein Verbraucher eingesteckt bzw. zugeschaltet wurde. Dabei handelt es sich häufig um Sonderlösungen, für die derzeit noch keine normativen Grundlagen zur Verfügung stehen. Durch Normung wird die langfristige Kompatibilität sichergestellt.

Bei Beleuchtungsanlagen, welche z. B. mit PoE realisiert werden, kommen herstellersistenspezifische Geräte („Ethernet-Switch“ mit PoE-Funktion) zum Einsatz. Neben der Energieübertragung für die Beleuchtung, können Daten wie z. B. Raumtemperaturen oder Raumauslastung übermittelt werden. Derartige Lösungen tragen zur Verbesserung der Energiebilanz von Gebäuden und elektrischen Anlagen bei.

1.1 Einführung und Hintergrund

Die Normungs-Roadmap „Gleichstrom im Niederspannungsbereich“ ist eine Gemeinschaftsarbeit zwischen der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE und den Experten der involvierten Interessenvertretungen/Fachkreise.

Unser elektrisches Energieversorgungssystem wurde entworfen, um aus zentralen Erzeugungsanlagen den Wechselstrom in Richtung dezentraler Verbraucher zu bewegen. Über Hoch-, Mittel- und Niederspannungsleitungen werden Haushalte und Unternehmen mit elektrischer Energie versorgt. Leuchten, Motoren, Netzgeräte und andere Verbraucher in Haushalten und Industrie sind die Abnehmer. Das bestehende Netz weist eine hierarchische Struktur auf. Durch die Einbindung regenerativer Energiequellen (Wind, Solar, Biomasse) ändert sich die Netzstruktur, da Einspeisequellen und Einspeiseorte hinzugekommen sind und weiterhin dazukommen. Hieraus resultiert eine heterogene Netzstruktur. Die Verbraucher von heute und die Erzeuger erneuerbarer Energien verlangen von uns dieses Modell zu überdenken.

Viele elektronische Betriebsmittel könnten mit Gleichspannung versorgt werden, ohne Konvertierungsverluste in Kauf nehmen zu müssen. Umwandlungsverluste von Wechselspannung in Gleichspannung könnten somit eingespart werden, Netzteilkomponenten wären überflüssig und Investitionskosten könnten eingespart werden. Nicht nur Endverbraucher, sondern auch Hersteller würden davon profitieren. AC/DC-Wandler könnten damit entfallen.

Ein Gleichstromsystem wäre für Energieerzeuger wie Photovoltaikanlagen und Brennstoffzellen gut geeignet. Die Energieerzeuger erzeugen oft Gleichstrom (z. B. Photovoltaik (PV), Brennstoffzelle). Dieser muss in einem AC-System aber erst von einem Wechselrichter umgewandelt werden, um daraufhin in das elektrische System des Gebäudes eingespeist zu werden, um letztendlich doch wieder in Gleichspannung zurückgewandelt zu werden, wo er dann für viele Endanwendungen benutzt werden kann. Diese DC-AC-DC-Umwandlungen führen zu erheblichen Energieverlusten und könnten in einem DC-Netz reduziert werden.

Mikroturbinen, kleine Wasserkraftwerke und Windkraftanlagen mit variabler Drehzahl erzeugen Wechselstrom mit einer anderen Frequenz als das Netz, und brauchen daher einen AC/DC/AC-Wandler. Diese Erzeuger können aus der Verbindung mit einem DC-System ebenfalls profitieren, da auch hier der DC/AC-Wandler entfernt werden oder durch einen einfacheren und kostengünstigeren AC/DC-Wandler ersetzt werden kann.

Auch Batterie- bzw. Speichersysteme können je nach Subnetzstruktur ohne Wandler direkt an das System angeschlossen werden, was Kosten einspart und Verluste reduziert.

In einem sogenannten Niederspannungs-Gleichstromnetz, auch Low-Voltage-Direct-Current-Grid genannt, wird der Wechselstrom beim Einspeisen in das Gleichstromnetz unter Verwendung von zentralen Umrichtern in Gleichstrom umgewandelt. Dieser Strom wird dann mit einer bestimmten Spannung direkt auf die bestehenden DC-Komponenten verteilt [1]. Hierdurch ergibt sich auch die Möglichkeit, auftretende Blindleistung im Wechselspannungsnetz zu kompensieren und so das speisende Netz zu stabilisieren. Diese Art der Umrichterschaltung wird auch als AFE-Umrichter (en: Active Front End) bezeichnet. Dieses Prinzip ermöglicht das Konzept einer geregelten Blindleistungsquelle. [2]

1.2 Mehrwert durch Normen

Der betriebs- und volkswirtschaftliche Nutzen des Normeneinsatzes beziffert sich laut dem Deutschen Institut für Normung e. V. (DIN e. V.) auf rund 16 Milliarden Euro pro Jahr. Dies wird durch die vielfältigen Auswirkungen des Einsatzes von Normen erreicht. Ein wesentliches Hilfsmittel zur Vermeidung von technischen Handelshemmnissen sind Normen. Sie erleichtern den Unternehmen den Zugang zum Weltmarkt. Ebenso kommt den Normen im Bereich der Produkthaftung eine sehr wichtige Rolle zu. Auch wenn die Anwendung von Normen nicht zwingend vorgeschrieben ist, so ist die Einhaltung von technischen Normen im Zusammenhang mit Produkthaftungsfragen entscheidend für den Entlastungsnachweis des Herstellers.

Normen bieten die Grundlage, Produkte sicher und verträglich mit der Gesundheit, dem Arbeitsschutz und der Umwelt zu machen. Sie sind weiterhin die Basis für Konformitäts- und Gütezeichen und ermöglichen generell eine vereinfachte Kommunikation zwischen allen Wirtschaftsbeteiligten.

Durch die Teilnahme an der Normungsarbeit können Unternehmen ihr eigenes Interesse einbringen, mit anderen Interessengemeinschaften in Kontakt treten und ihren Wissensvorsprung ausbauen, denn sie wirken dort, wo die weltweite Sprache der Technik definiert wird.

Standards machen Produkte, Dienstleistungen, Produktions- und Arbeitsprozesse sicherer und besser. Normen tragen dazu bei, dass Systeme ineinander greifen, eins zum anderen passt und Leistungen effizienter werden. Europäische und internationale Normen erleichtern den weltweiten Austausch von Waren und Dienstleistungen.

Das Entwickeln von Normen kann dem Ökosystem einer aufkommenden Technologie bei der Lösung von Problemen helfen, um die erfolgreiche Kommerzialisierung neuer Produkte zu fördern. Deshalb machen Normen für den Erfolg innovativer Unternehmen einen solch großen Unterschied aus: Sie erschaffen einen gemeinsamen Rahmen für die Innovation und etablieren die „Spielregeln“. Normen legen den Rahmen fest, indem sie gemeinsame Terminologien definieren, die grundlegenden Merkmale eines Produkts oder einer Dienstleistung etablieren und die bewährten Verfahren innerhalb des Ökosystems identifizieren, die zu erfolgreichen Ergebnissen führen.

Sobald diese Regeln etabliert sind, wird die Innovation beschleunigt und der Erfolg wahrscheinlicher.

1.3 Motivation und Handlungsbedarf im Bereich LVDC

1.3.1 AC-Vorteile gegenüber DC

Zur Übertragung und Verteilung elektrischer Energie über weite Distanzen wird eine hohe Spannung bevorzugt, da hier die Transportverluste reduziert werden können, im Gegensatz zur Verwendung einer niedrigeren Spannung. Die Wandlung von Wechselspannung wurde bisher mittels Transformatoren realisiert. Historisch war dies der entscheidende Vorteil für AC Systeme [3]. Dabei ist die Baugröße und damit der Materialaufwand von der verwendeten Frequenz abhängig. Durch die Entwicklungen im Bereich der Halbleitertechnologie ist es heute möglich, einfach und mit hohem Wirkungsgrad Wechselspannungen höherer Frequenz zu erzeugen. Damit sinkt der Materialaufwand für den Transformator, da dieser dann kompakter aufgebaut werden kann. Zusätzlich kann eine bessere Regelbarkeit des Energieflusses im Netz erreicht werden.

Sicherheit der Benutzer und Komponenten wird durch bewährte Schutzkonzepte und Schutzeinrichtungen gewährleistet. Wissen und Erfahrung sind offensichtliche Vorteile für Wechselstromsysteme.

1.3.2 DC-Vorteile gegenüber AC

Dezentrale Energieerzeuger produzieren oft Gleichstrom oder nutzen Gleichstrom in ihren Umwandlungen. In den meisten Verbrauchern wird eine Gleichspannung zur internen Versorgung der einzelnen Funktionskomponenten eingesetzt und ist somit in den Geräten präsent. Mit Hilfe eines DC-Netzes entfallen die Umwandlungsschritte von DC zu AC und zurück von AC zu DC. Dies resultiert in einem geringeren Materialaufwand; zusätzlich werden Umwandlungsverluste reduziert. Die Speicherung und die Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) werden durch Batterien mittels Gleichstrom zur Verfügung gestellt. Vorteil ist auf alle Fälle im DC-Netz die echte Unterbrechungsfreiheit. Die 5 bis 8 ms Umschaltzeit zur Erkennung von Abweichungen in Phasenlage, Phasenwinkel und Amplitude von Bypass und Transferschalter entfallen.

Durch Integration von DC-Netzen in das AC-Netz lassen sich durch einfache Maßnahmen Rückwirkungen auf das AC-Netz reduzieren und Lastspitzen kompensieren. In Endgeräten wäre dies aufwendiger.

Gleichstrom bringt unabhängig vom Anwendungsgebiet bereits einen energetischen Vorteil mit sich. Es kommt nämlich zu einer effizienteren Nutzung des vorhandenen Leiterquerschnitts. Die Stromdichte ist über den gesamten Leiterquerschnitt gleichmäßig verteilt. Die Stromverdrängung (Skin-Effekt) tritt nur bei Anlegen einer Wechselspannung ein, und führt zu einer höheren, oberflächennahen Stromdichte [4] [5]. Eine Leitung, die zwei Knotenpunkte eines Netzes miteinander verbindet und zuvor mit einer Wechselspannung von 400 V effektiv betrieben wurde, kann unter Verwendung einer Gleichspannung von 400 V DC den Leiterquerschnitt um den Faktor 0,867 reduzieren [6]. Gleichstrom könnte somit aus Sicht der Leiterbelastung problemlos über bereits installierte Kabel übertragen werden [7]. Zwingend ist zu überprüfen, ob die Isolationen und vorhandene Installationstechnik, wie z. B. Klemmen, Schutz- und Schaltgeräte, für die Nutzung von DC geeignet sind.

Als weiterer Vorteil gegenüber dem Wechselstromsystem ist die nicht vorhandene Blindleistung zu sehen, resultieren hieraus doch eine zusätzliche Belastung und damit einhergehende Verluste auf dem Übertragungswege.

1.3.3 Umwandlungsprozesse in AC und DC

Von AC auf DC

Wechselstrom wird durch Gleichrichter in Gleichstrom umgewandelt. In den meisten Geräten ist eine entsprechende Einheit eingebaut, die eine normenkonforme Stromform des vom Gerät aufgenommenen Stromes gewährleistet. Diese sind meist in Geräten verbaut, bei denen Gleichstrom benötigt wird. Ein Gleichrichter beinhaltet im einfachsten Fall eine Dioden Brücke und einen Kondensator.

Die Dioden in der Brücke sind so angeordnet, dass ein sinusförmiger Strom in einen positiven Strom umgewandelt wird. Der Strom wird dann mit Hilfe eines geeigneten Filters auf einen konstanten Gleichstrom geglättet [9]. Der geglättete Strom kann nun für Gleichstromanwendungen genutzt werden.

Von DC auf AC – Umwandlung einer Gleichspannung in eine Wechselspannung

Um Gleichstrom in Wechselstrom umzuwandeln, muss Strom in eine positive Richtung und dann in die negative Richtung geführt werden. Das kann mit zwei Schaltern bewerkstelligt werden. Einer der Schalter leitet in eine Richtung, während der andere geöffnet wird und umgekehrt. Mit der entsprechenden Frequenz der Schaltvorgänge wird Wellenform und Frequenz des Stromes vorgegeben. Es ist üblich die Pulsweitenmodulation (PWM) zu verwenden, die in der Lage ist rechteckige Impulse unterschiedlicher Breite zu erzeugen, um ein Sinuswellensignal zu formen. Je schneller die Kommutierung, desto höher sind die Frequenzen der Oberschwingung und damit sind diese auch leichter zu filtern. Jedoch gilt auch; je häufiger die Kommutierung, desto höher sind die Kommutierungsverluste [8].

DC/DC

Um eine Gleichspannung in eine andere Gleichspannung unterschiedlichen Pegels umzuwandeln, ist eine mögliche Lösung die Eingangsenergie in entweder Magnetfeldspeichern (Speicherdrossel oder Transformator) oder Speicherkomponenten mit einem elektrischen Feld (Kondensator) zu leiten und die Energie dann mit einer anderen Spannung freizugeben. Der Wirkungsgrad solcher Vorrichtungen liegt bei 75 bis 98 % [8] [9]. Es existieren unterschiedliche Topologien (wie z. B. Resonanzwandler und Multiphasenwandler) für DC-DC-Wandler, die nach verschiedenen Kriterien klassifiziert und in die drei Hauptgruppen Flusswandler, Sperrwandler und Resonanzwandler eingeordnet werden.

AC/AC

Wechselspannung wird mit Transformatoren nach oben oder unten [10] transformiert. Die Transformatoreffizienz beträgt etwa 98 %. Einige experimentelle Transformatoren mit supraleitenden Wicklungen können einen Wirkungsgrad von bis zu 99,9 % erreichen. Jedoch ist diese simple Umsetzung nur dann möglich, wenn die Frequenz der Eingangsspannung mit der Frequenz der Ausgangsspannung übereinstimmen soll. Möchte man eine unterschiedliche Frequenz für den Ausgang nutzen, ist ein Zwischenkreis notwendig, der die Wechselspannung erst in Gleichspannung und dann durch Modulation in eine neue Wechselspannung umwandelt [8] [11].

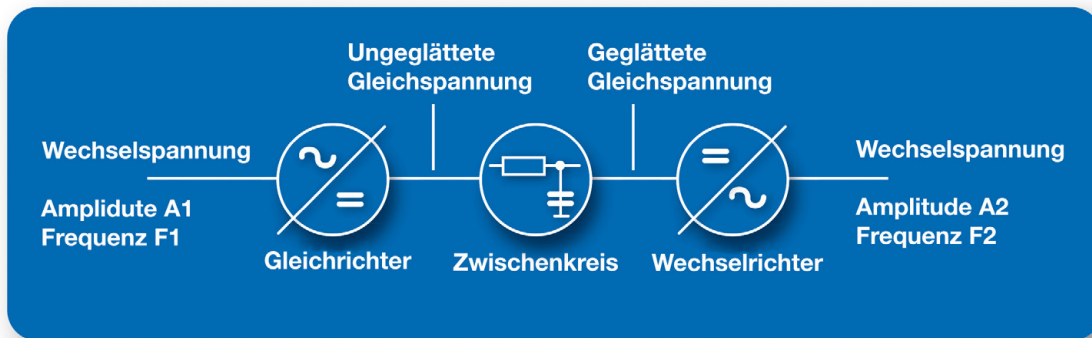


Abbildung 1 – Frequenzumrichter Aufbau

Transformieren, Gleichrichten und Frequenzumrichten sind dabei Vorgänge, die unvermeidbare Verluste mit sich bringen. Dabei ist z. B. die Eingangsbeschaltung elektronischer Geräte, welche die angeschlossene Wechselspannung umwandelt, für 40 bis 80 % der Verlustleistung, 50 bis 95 % des Gewichts und 50 bis 95 % des Bauvolumens der Netzteile verantwortlich. Auch das Wechselspannungs-Frontend elektronischer Schaltungen zur Regelung elektrischer Antriebe ist für ca. 50 % der Kosten, ca. 50 % der Verlustleistung und über 65 % des Bauvolumens der Beschaltung verantwortlich [12] [13] [7]. Ein LVDC-Netz versucht, diese Prozesse weitestgehend zu umgehen, um so ein effizienteres System zu schaffen [15].

2 BEGRIFFSDEFINITIONEN

2.1 Low Voltage Direct Current

Der Niederspannungsbereich geht bei Gleichspannungen bis 1 500 V. In der internationalen Normungsarbeit wird dieses Thema unter dem Begriff „Low-Voltage-Direct-Current“ (LVDC) geführt.

2.2 Konformität

Die Konformität wird als Übereinstimmung eines Systems mit den in einer Spezifikation formulierten Anforderungen bezeichnet. Die Konformität der Schnittstellen eines Systems mit den entsprechenden Schnittstellenspezifikationen gilt als Vorbedingung dafür, dass sich zwei oder mehrere Systeme über diese Schnittstelle miteinander verbinden lassen und dann in der Lage sind, miteinander zu kommunizieren.

Konformitätsbewertung ist in der internationalen Norm DIN EN ISO/IEC 17000 „Konformitätsbewertung – Begriffe und allgemeine Grundlagen“ definiert als „Darlegung, dass festgelegte Anforderungen bezogen auf ein Produkt, einen Prozess, ein System, eine Person oder eine Stelle erfüllt sind“.

Eine besondere Bedeutung hat Konformitätsbewertung in Europa im geregelten Bereich bei der Bewertung von Produkten auf Übereinstimmung mit den Anforderungen einer EU-Richtlinie. Gemäß Art. 95-EG Vertrag für den Europäischen Binnenmarkt legen EU-Richtlinien für zahlreiche Produkte Mindestanforderungen an die Sicherheit fest, die vom Hersteller erfüllt werden müssen.

2.3. Interoperabilität

Interoperabilität ist eine grundlegende Anforderung an die vernetzten Komponenten, Geräte oder Anlagen innerhalb eines Systems. Sie bezeichnet demzufolge die Fähigkeit von zwei oder mehr Systemen, zur Erfüllung einer Aufgabe mittels Kommunikation über ihre Schnittstelle zusammenzuarbeiten. So ist es wenig verwunderlich, dass in vielen Untersuchungen, Studien und Marktberichten einhellig zu lesen ist, die Interoperabilität stelle ein wichtiges Thema für den Erfolg von neuen Technologien dar.

Das European Telecommunications Standards Institute (ETSI) definiert Interoperabilität als die Fähigkeit von Systemen, Geräten, Anwendungen oder Komponenten, miteinander zu funktionieren, Ressourcen und Informationen auszutauschen und zu verwenden. Ein Bericht der ETSI differenzierte Interoperabilität wie folgt: Protokoll-Interoperabilität, Dienst-Interoperabilität, Anwendungs-Interoperabilität und Interoperabilität aus Anwendersicht.

2.4 Kompatibilität

Unter Kompatibilität (auch: Verträglichkeit) wird in der Technik entweder

- die Austauschbarkeit von Baugruppen,
- die Vereinbarkeit von Eigenschaften oder
- die Gleichwertigkeit von Eigenschaften

verstanden. Erfüllt ein (oft neueres) System die Anforderungen eines anderen (und geht evtl. darüber hinaus),

so spricht man von Abwärtskompatibilität (oder Rückwärtskompatibilität). Kann ein altes System die (Grund-) Anforderungen eines neuen erfüllen, nennt man dies Aufwärtskompatibilität (oder Vorwärtskompatibilität).

Ein elektronisches Bauteil kann zu einem anderen mit unterschiedlicher Bezeichnung kompatibel sein. Die Bauteile können dann ausgetauscht werden, da sie dieselben Eigenschaften haben und meistens die gleiche oder eine ähnliche Bauform.

2.5 Use Case und User Story

Eine User Story („Anwendererzählung“) ist eine in der Regel textuelle Beschreibung einer im Allgemeinen domänen-übergreifenden Anwendung aus der Sicht des Benutzers. Aus den User Stories kann eine Reihe von mehreren erforderlichen Use Cases („Anwendungsfälle“) abgeleitet werden. Diese liefern eine detaillierte Ablaufbeschreibung aus Sicht der Akteure und Komponenten.

Für die Umsetzung einer User Story sind im Allgemeinen mehrere Use Cases einzubeziehen. Der Zusammenhang zwischen User Stories und Use Cases kann durch eine Zuordnungstabelle wiedergegeben werden (Mapping User Stories – Use Cases).

3 NORMUNG UND STANDARDISIERUNG

In erster Linie schaffen Normen und Standards eine sichere Grundlage für die technische Beschaffung. Sie stellen nicht nur die Interoperabilität im Anwendungsfall sicher, sondern schützen auch Umwelt, Anlagen und Verbraucher. Sie bilden eine zukunftssichere Grundlage für die Produktentwicklung und unterstützen die Kommunikation unter allen Beteiligten durch einheitliche Begriffe und Konzepte. Sie legen Rahmenbedingungen fest und bieten somit ein gewisses Maß an Investitionssicherheit. Der Entwicklungsprozess von Normen und Standards findet auf unterschiedlichen Ebenen (national, europäisch, international) in verschiedenen Organisationen statt. Sogenannte „interessierte Kreise“ (Unternehmen, Handel, Hochschulen, Verbraucher, Handwerk, Prüfinstitute, Behörden, Versicherer usw.) senden ihre Experten in Arbeitsgruppen einer Normungsinstitution, wo die Normungsarbeit organisiert und durchgeführt wird.

Normung und Standardisierung sollte dabei so „offen“ erfolgen, dass ausreichend Raum für die Entwicklung von innovativen und im Wettbewerb differenzierbaren Systemen bleibt. Eine zu enge Spezifizierung könnte zukünftige Innovationen verhindern. Auch für eine schnelle Umsetzung in die Praxis ist eine zeitnahe Stabilisierung der Konzepte durch einen konsensbasierten, forschungsbegleitenden Standardisierungs- und Normungsprozess unerlässlich. Ziel sollte somit sein, alle für die einheitliche technische Funktion und Anwendbarkeit wesentlichen Festlegungen in nationalen und internationalen Normen zu verankern.

3.1 Normung

Als Normungen werden die planmäßigen Vorgänge und Tätigkeiten zum Schaffen und Inkraftsetzen von Regelungen bezeichnet, mit denen Produkte und Dienstleistungen vereinheitlicht werden.

Normung hat zum Ziel, innerhalb des Interessentenkreises national wie international durch Vereinheitlichung und Standardisierung technische Anwendungshemmnisse zu vermeiden und den Austausch von Waren und Dienstleistungen zu fördern. Weitere Folgen einer Normung sind Rationalisierung, Kompatibilität, Gebrauchstauglichkeit und Sicherheit bei der Verwendung von Produkten und Dienstleistungen. Normung kommt vor allem zur Anwendung, wenn gleichartige oder ähnliche Gegenstände in vielen unterschiedlichen Zusammenhängen an verschiedenen Orten von verschiedenen Personenkreisen gebraucht werden. Somit versteht sich Normung als die planmäßige Gemeinschaftsarbeit der interessierten Kreise zur Vereinheitlichung von materiellen und immateriellen Gegenständen. Das wohl bekannteste Beispiel für erfolgreiche Normung ist das vereinheitlichte Papierformat DIN A4. Normen halten den Stand der Technik in öffentlich zugänglichen Dokumenten fest und sorgen somit durch diskriminierungsfreien Zugang zu Wissen und Information für:

- Marktbildung bei innovativen Lösungen,
- Marktöffnung,
- Wissenstransfer,
- Verbreitung von Best Practices,
- Interoperabilität,
- Reputationstransfer auf den Anwender,
- Vertrauen in Dienste und Produkte, die normgerecht erstellt wurden.

Nach den Grundsätzen der Normungsarbeit darf Normung zu keinem individuellen Sondervorteil führen. Ihre Aufgabe ist es, einen gesamtgesellschaftlichen Nutzen zu erzielen, was den Hauptunterschied zur Konsortialstandardisierung darstellt. Die elektrotechnische Normung findet in Deutschland in den Gremien der DKE Deutschen Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE statt, das die Erarbeitung nationaler Normen sowie die Vertretung Deutschlands in den europäischen und internationalen Normungsorganisationen übernimmt.

In einer vernetzten Welt nutzt die sichere Infrastruktur eines Teilnehmers auch den anderen Teilnehmern, da diese nicht für Angriffe missbraucht werden kann. Dadurch, dass positive Netzwerkeffekte hier zutage treten, bietet sich die Normung, wie kaum ein anderes Instrument, als gemeinschaftliche Aufgabe an, diese Netzwerkeffekte gezielt zu fördern und das allgemeine Sicherheitsniveau zum Nutzen aller zu erhöhen.

3.2 Standardisierung

Im eigentlichen Wortsinn bedeutet Standardisierung eine Vereinheitlichung von Waren, Dienstleistungen und Verfahren nach einem bestimmten Muster in Bezug auf Maße, Typen, oder auch Verfahrensweisen. Zum Ziel hat Standardisierung, die Schaffung gemeinsamer Parameter, beispielsweise bei Werkzeugen, Produktions- oder Softwarekomponenten. Standardisierung ist somit eine technische Regelsetzung ohne zwingenden Einbezug aller interessierten Kreise und ohne die verpflichtende Beteiligung der Öffentlichkeit.

Der Erarbeitungsprozess von Spezifikationen, beziehungsweise Parametern, wird in der Deutschen Normungsstrategie zur Unterscheidung von der vollkonsensbasierten Normung als Standardisierung bezeichnet. Bei der DKE ist die Standardisierung ein Mittel, um den Wissens- und Technologietransfer zwischen den beteiligten Kreisen effizient und effektiv zu gestalten, wodurch der Fortschritt der Entwicklungen gefördert wird. Hierzu müssen ausgehend von Forschung und Entwicklung in innovativen Technologiegebieten neue Trends für den Standardisierungsbedarf erkannt und aufgegriffen werden. Anschließend werden Spezifikationen (Leitfäden, DIN-Specs und VDE-Anwendungsregeln) erarbeitet, die sich später unter Einbeziehung aller interessierten Kreise und der Öffentlichkeit konsensbasiert in Normen überführen lassen. Eine Spezifikation enthält das Ergebnis einer Standardisierungsarbeit und spiegelt dadurch den Stand der Technik wieder. Sofern ein öffentliches Einspruchsverfahren durchgeführt wurde, kann sie den Status „allgemein anerkannter Stand der Technik“ erlangen.

In Tabelle 1 sind die Unterschiede einer Spezifikation zur Normung dargestellt.

GRUNDSATZ	NORM	SPEZIFIKATION
1. Freiwilligkeit	X	X
2. Öffentlichkeit	X	
3. Jedermann	X	(X)
4. Einheitlichkeit und Widerspruchsfreiheit	X	X
5. Sachbezogenheit	X	X
6. Konsens	X	(X)
7. Ausrichtung am Stand der Technik	X	X
8. Ausrichtung an den wirtschaftlichen Gegebenheiten	X	X
9. Ausrichtung am allgemeinen Nutzen	X	X
10. Internationalität	X	
X Anwendung (X) eingeschränkte Anwendung		

Tabelle 1 – Eigenschaften von Normen und Spezifikationen im Vergleich

Der Begriff de-jure-Standard kommt aus dem englischen Sprachgebrauch und deckt sich mit dem deutschen Begriff „Norm“. Im Gegensatz dazu ist ein de-facto-Standard ein Ergebnis, das nicht durch wenigstens ein nationales Normungsverfahren erarbeitet wurde. Insoweit gibt es für den deutschen Terminus „Norm“ mit dem englischen Begriff „standard“ keine kompakte Übersetzung in vergleichbarer Eingrenzung.

Für de-facto Standard wird der Begriff „Industriestandard“, für seine Entstehung der Begriff „Standardisierung“ verwendet. Insoweit sind auch sämtliche Standards von industriellen Interessengruppen de-facto-Standards, wie beispielsweise die Bluetooth-Protokolle der Bluetooth-SIG oder das IrDa-Protokoll der Infrared-Data-Association.

3.3 Struktur der Normungs- und Standardisierungslandschaft

Im Sinne der vollkonsensbasierten Normung sind die Stränge Internationale Organisation für Normung (ISO), Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) und Internationale Fernmeldeunion (ITU) die maßgeblichen Normungsorganisationen auf internationaler Ebene. Die zugehörigen auf europäischer und nationaler Ebene verantwortlichen Normungsorganisationen sind das Europäische Komitee für Normung (CEN) und das Deutsche Institut für Normung (DIN) sowie das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC), das Europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) und die Deutsche Kommission Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik in DIN und VDE (DKE) (siehe Abbildung 2). Mitglieder in ISO, IEC, CEN und CENELEC sind die jeweils nationalen Normungsorganisationen.



Abbildung 2 – Übersicht der Normungsorganisationen

3.3.1 DIN, CEN und ISO

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. bietet allen Interessierten eine gemeinsame Plattform zur Erarbeitung von Normen und Spezifikationen als Dienstleistung für Wirtschaft, Staat und Gesellschaft. DIN ist eine privatwirtschaftliche Organisation mit dem rechtlichen Status eines gemeinnützigen Vereins. Die Mitglieder von DIN sind Unternehmen, Verbände, Behörden und andere Institutionen aus Industrie, Handel, Handwerk und Wissenschaft.

Die Hauptaufgabe von DIN besteht darin, gemeinsam mit den Vertretern der interessierten Kreise konsensbasierte Normen markt- und zeitgerecht zu erarbeiten. Aufgrund eines Vertrages mit der Bundesrepublik Deutschland ist DIN als nationale Normungsorganisation unter den europäischen und internationalen Normungsorganisationen anerkannt.

Heute ist die Normungsarbeit von DIN zu fast 90 % europäisch und international ausgerichtet. Die Mitarbeiter des DIN organisieren den gesamten Prozess der nichtelektrotechnischen Normung auf nationaler Ebene und stellen somit die deutsche Beteiligung auf europäischer und internationaler Ebene über die entsprechenden nationalen Gremien sicher. DIN vertritt hierbei die Normungsinteressen Deutschlands als Mitglied bei CEN sowie als Mitglied in der ISO.

3.3.2 DKE, CENELEC und IEC

Die DKE nimmt die Interessen der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik auf dem Gebiet der nationalen und internationalen elektrotechnischen Normungsarbeit wahr und wird vom VDE getragen. Sie ist für die Normungsarbeiten zuständig, die in den entsprechenden nationalen und internationalen Organisatio-



nen (IEC, CENELEC und ETSI) behandelt werden. Sie vertritt somit die deutschen Interessen sowohl bei der CENELEC als auch in der IEC. Als eine moderne und gemeinnützige Dienstleistungsorganisation dient die DKE der sicheren und rationellen Erzeugung, Verteilung und Anwendung der Elektrizität und so dem Nutzen der Allgemeinheit.

Die Aufgabe der DKE ist es, Normen im Bereich der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik zu erarbeiten und zu veröffentlichen. Die Ergebnisse der elektrotechnischen Normungsarbeit der DKE werden in DIN-Normen niedergelegt, die als Deutsche Normen in das Deutsche Normenwerk des DIN und, wenn sie sicherheitstechnische Festlegungen enthalten, gleichzeitig als VDE-Bestimmungen in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen werden.

Ziele der DKE:

- Sicherheit
Umfassende Sicherheit elektrotechnischer Produkte und Anlagen sowie der damit verbundenen Dienstleistungen und im Arbeitsschutz,
- Kompatibilität
Systemkompatibilität von Produkten und Anlagen in vernetzten Systemen und Anwendungen,
- Marktorientierung
Beschleunigte Marktdurchdringung neuer Technologien durch Unterstützung der Informationsprozesse mittels Normen und Standards,
- Konsensbildung
Zusammenführen des Wissens und der Interessen aller betroffenen Fachkreise sowie Konsensbildung auch in kontrovers diskutierten Sachfragen,
- Interessenvertretung
Vertretung der deutschen Interessen bei der Weiterentwicklung der europäischen und internationalen Normen zum Abbau von Handelshemmnissen und zur weltweiten Öffnung der Märkte,
- Qualität
Qualitativ hochwertige und aktuelle Regeln in einem konsistenten und breit akzeptierten Normenwerk mit markt- und bedarfsorientierter Ausrichtung,
- Konformitätsbewertung
Weltweite Anerkennung von Konformitätsbewertungsergebnissen.

3.3.3 IEEE USA



Das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) ist ein Berufsverband von Ingenieuren aus den Bereichen Elektrotechnik und Informationstechnik. Ihm gehören Mitglieder aus über 160 Ländern an. Hervorgegangen ist der IEEE im Jahre 1963 aus dem Zusammenschluss der beiden amerikanischen Ingenieursverbände American Institute of Electrical Engineers (AIEE) und Institute of Radio Engineers (IRE). Gegliedert ist der Verband in zehn Regionen, die über die ganze Welt verteilt sind. Die Mitgliedsarbeit ist in 300 länderorientierte Gruppen aufgeteilt, die wiederum aus vielen Ortsverbänden bestehen. Zusätzlich gibt es zahlreiche sogenannte Societies, die sich mit speziellen Gebieten der Elektro- und Informationstechnik auseinandersetzen. Mehrere Societies sind zu einem Technical Council zusammengeschlossen. Die sechs Technical Councils wenden sich breiter gefassten technischen Fragestellungen zu. Das IEEE ist neben der Herausgabe von Fachzeitschriften und -beiträgen auch auf die Organisation fachspezifischer Tagungen und Konferenzen spezialisiert. Daneben ist es für seine Arbeiten an der Standardisierung von Techniken, Hardware und Soft-

ware bekannt wie zum Beispiel der Standard IEEE 802.11 „Standard für Wireless LAN (WLAN)“ und der IEEE 802.16 „Standard für Broadband Wireless Access (WIMAX)“.

3.4 Nationale und internationale Aktivitäten

Zur Identifizierung der Arbeiten und Koordinierung der nationalen und internationalen Aktivitäten sind unter anderen folgende Gremien aktiv:

- „System Committee Low Voltage Direct Current and Low Voltage Direct Current for Electricity Access“ (SyC LVDC) bei IEC als Nachfolger der „System Evaluation Group – Low Voltage Direct Current Applications, Distribution and Safety for use in Developed and Developing Economies“ (IEC/SEG 4) auf internationaler Ebene zur strategischen Ausrichtung sowie Koordination der TCs,
- IEC/TC 3 „Information structures and elements, identification and marking principles, documentation and graphical symbols“ beschäftigt sich mit der Kennzeichnung von Anlagen und Betriebsmitteln,
- IEC TC8 WG9 „LVDC distribution“,
- IEC/TC 23 „Electrical accessories“ auf internationaler Ebene,
- IEC/SC 23E „Circuit-breakers and similar equipment for household use“ hat den Entwurf E DIN IEC 60898-3 (VDE 0641-13) „Leitungsschutzschalter für Hausinstallationen und ähnliche Zwecke“ für Leitungsschutzschalter für reinen Gleichstrom erarbeitet und die für RCDs für Gleichstromanwendungen heraus gegeben,
- IEC/TC 64 „Electrical installations and protection against electric shock“,
- IEC/TC 82 „Solar photovoltaic energy systems“,
- nationale Spiegelgremien der oben genannten IEC-Komitees bei der DKE,
- DKE/UK221.6. „Niederspannungsgleichstromverteilnetze“ als Spiegelgremium des IEC SyC LVDC und Nachfolger des TBINK_LVDC (Technischer Beirat Internationale und Nationale Koordinierung) „Niederspannungsgleichstromverteilnetze“ auf nationaler Ebene,
- DKE/AK221.6.1 „Normungs-Roadmap“ als Nachfolger des TBINK_LVDC_AK_DC erarbeitet die Deutsche Normungs-Roadmap „Gleichstrom im Niederspannungsbereich“,
- DKE/AK221.6.2 „Niederspannungsgleichstrominstallationen“,
- Energietechnische Gesellschaft im VDE: erarbeitet zurzeit eine Grundsatzstudie zum Thema „Gleichspannung in Verteilnetzen“.

3.5 Deutsche Normungs-Roadmaps

In den bereits vorliegenden deutschen Normungs-Roadmaps finden sich umfangreiche und teilweise vergleichbare Darstellungen zur Normungslandschaft.

3.5.1 Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität 2020

Fossile Energieträger bilden eine wichtige Säule bei der Energieversorgung der Menschen. Ihre Verfügbarkeit, beispielsweise in Form von Kraftstoffen für Verbrennungsmotoren, sinkt, was steigende Preise zur Folge hat. Zusätzlich haben die bei der Verbrennung entstehenden Abgase einen negativen Einfluss auf unsere Umwelt. Aus diesem Grund muss Energie aus umweltverträglichen Quellen bereitgestellt werden, um das Mobilitätsbedürfnis der Menschen auch in der Zukunft nachhaltig erfüllen zu können. Die Zukunft der Energieversorgung gehört daher nachhaltigen Energiequellen, die langfristig und politisch verlässlich verfügbar sind und



deren ökologischer „Footprint“ minimal ist. Nutzt die Elektromobilität diese nachhaltigen Energiequellen, hilft sie, die Weichen für eine lebenswerte Zukunft zu stellen. Durch Etablierung ressourcenschonender Kreisläufe und Prozesse wird der Fortschritt nachhaltig gefördert und gleichzeitig der gewohnte Komfort für die Nutzer erhalten.

Damit Strom aus erneuerbaren Energiequellen auch für Elektrofahrzeuge bequem zur Verfügung steht, bedarf es eines strategischen Konzepts zur Lösung der anstehenden Herausforderungen. Global zu denken ist beim Fahrzeug mit Elektroantrieb derzeit in erster Linie noch eine Frage von technischen Eckwerten: Ladeleistung, Ladestecker und Batteriekapazität. Was letztlich die Akzeptanz der Nutzer findet, entscheiden Funktionalität, Preis, Umweltbewusstsein und Verantwortung über Ländergrenzen hinaus. Vor allem sind „runde Tische“ gefragt, an denen Beteiligte Fortschritte gemeinsam entwickeln und gezielt Normen und Spezifikationen, auf denen weiter aufgebaut wird, voranbringen können. Automobilhersteller, Energielieferanten, Netzanbieter und Forschungseinrichtungen haben längst erkannt, wie eng ihr Elektromobilitätsnetz miteinander verwoben ist. Das Elektromobil der Zukunft wird als entscheidendes Element in das intelligente Stromnetz „Smart-Grid“ eingebunden sein. Viele neue Schnittstellen tun sich auf und bieten gleichzeitig Chancen für die Weiterentwicklung bestehender Schnittstellen.

Durch Elektrofahrzeuge werden neue Konzepte für deren Ladevorgang erarbeitet, die insbesondere die Integration dieser in die Smart-Home-Infrastruktur berücksichtigen. Das Elektrofahrzeug der Zukunft könnte als Energiespeicher genutzt werden, um überschüssige Energie, beispielsweise aus der heimischen PV-Anlage, aufzunehmen. Über- und Unterangebote an Stromversorgung könnten so in einem bundesweiten Smart-Grid-Netz ausgeglichen werden. Die Vernetzung der Systeme der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) innerhalb und außerhalb des Eigenheimes ist dafür zwingende Voraussetzung. Ladestationen, die durch den heimischen Solar-Carport und lokale Batteriespeicher ergänzt werden können, müssen vor Ort in einem solchen Smart-Grid-System integriert sein.

Normung und Standardisierung sind in diesem Kontext sehr wichtig, da sie die Position der deutschen Wirtschaft im europäischen und internationalen Umfeld stärken und Investitionssicherheit bieten. Domänen wie Automobiltechnik und Elektrotechnik/Energietechnik sowie IKT müssen für eine erfolgreiche Elektromobilität und deren Integration in die Smart-Home-Infrastruktur zusammenwachsen. Durch das Zusammenfinden dieser zuvor getrennten Gebiete werden neue Geschäftsbeziehungen und Bereiche der Wertschöpfung entstehen.



Deutsche
Normungs-Roadmap
Elektromobilität 2020

Die „Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität 2020“ ist 2017 erschienen und stellt eine Fortschreibung der ersten, im Herbst 2010 vorgestellten Deutschen Normungs-Roadmap Elektromobilität dar. Sie greift aktuelle Entwicklungen der Elektromobilität sowie der Rahmenbedingungen auf und stellt diese in Bezug zu laufenden und notwendigen Normungsaktivitäten. Die Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität enthält das gemeinsame Verständnis aller in die Elektromobilität involvierten Akteure. An der Erstellung waren neben Fahrzeugherstellern, Elektroindustriellen, Energielieferanten/Netzbetreibern und Informationsnetzprovidern auch Verbände und Politik beteiligt. Aus diesem Grund stellt die Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität die deutsche Normungsstrategie für diesen Bereich dar.



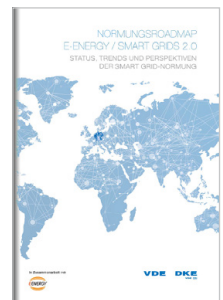
3.5.2 Normungs-Roadmap E Energy/Smart-Grids Version 2.0

Der Umbau der deutschen Energieversorgung „am offenen Herzen“ bringt gewaltige Herausforderungen mit sich. Es gilt, während des laufenden Betriebs grundlegende strukturelle Veränderung im Systemdesign vorzunehmen. Diese betreffen insbesondere den Ausbau und die Integration der erneuerbaren Energien, aber auch die Neuordnung der Märkte. Das Smart-Grid, die Verbindung von Energietechnik mit IKT, spielt bei diesem Umbau eine Schlüsselrolle: Ohne die Automatisierung der Verteilungsnetze zur intelligenten Synchronisierung von Stromerzeugung und -verbrauch sowie dem Ausbau des Stromnetzes ist die Energiewende nicht zu realisieren. Die Normung ist damit eine notwendige Voraussetzung für die technische Umsetzung und für die erforderliche Investitionssicherheit beim Aufbau des Smart-Grid. Mit der zweiten Stufe der deutschen Normungs-Roadmap „E-Energy/Smart-Grids“ wurde nun ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zum Smart-Grid gesetzt.

Die Normungs-Roadmap 2.0 übernimmt nicht nur eine Pionierrolle auf dem Gebiet E-Energy/Smart-Grid, vielmehr wurde eine neue Herangehensweise an die Normung an sich etabliert, die den vielfältigen Herausforderungen in komplexen Systemen im Allgemeinen Rechnung trägt. Wesentlich ist dabei die Integration von unterschiedlichsten Teilgebieten und Fachkreisen. Dies wird über die Ausrichtung der Aktivitäten auf die gewünschten oder geforderten Dienste erreicht, die das komplexe System Smart-Grid anbieten soll. Mithilfe eines generischen Modells (SGAM; en: Smart-Grid Architecture Model) werden dann die Umsetzungsmöglichkeiten untersucht. Dabei wird durch die Beschreibung der Dienste und die zunehmende Detaillierung in „Use Cases“ (Anwendungsfällen) auf Funktions-, Informations-, Kommunikations- und Komponentenebene die Voraussetzung für die Zusammenarbeit der unterschiedlichsten beteiligten Normungsgremien am gemeinsamen Ziel der Realisierung gewünschter Dienste und Funktionen geschaffen.

Die in der Roadmap entwickelten Verfahren werden heute schon in vergleichbar komplexen Aufgabenstellungen genutzt, wie beispielsweise auf den Feldern E-Mobility, Active Assisted Living (AAL) und Smart Home. Dabei geht es stets um die gemeinsame Erarbeitung von Themen wie Definitionen von Anforderungen für Anwendungen (Requirements), Komplexitätsreduktion, gemeinsames Verständnis und Konsensbildung, und damit um die Grundfesten der Normung an sich. Eine besondere Aufgabe stellen die nationalen und regionalen Regulierungsanstrengungen dar, die teilweise sehr detaillierte Vorgaben definieren. Hier empfiehlt sich laut der Roadmap der bewährte Ansatz, die Ausformulierung der technischen Details den etablierten Normungsgremien zu überlassen. Durch das beschriebene Vorgehen kann die Basis für Konsensbildung so auch bei sehr unterschiedlichen Interessengruppen gewahrt werden.

Auch auf europäischer und internationaler Ebene haben die deutschen Arbeiten großen Anklang gefunden. So folgen die Aktivitäten zur Umsetzung des Smart-Grid Normungsmandates M/490 der EU-Kommission und die Tätigkeiten auf IEC-Ebene der dargestellten Methodik. Allerdings sind die Akteure verstärkt auf die Mitarbeit von Industrie, Politik sowie der gesamten Öffentlichkeit angewiesen, damit die komplexe Normungsarbeit schnell Früchte trägt. Die gestarteten Arbeiten müssen stärker detailliert und in bestehenden Gremien umgesetzt werden. Dabei gilt es auch, die im Bereich der Energie-, Industrie- und Gebäudeautomatisierung bestehenden international anerkannten Normen zu beachten, zu nutzen und bekannt zu machen. Damit Deutschland auch künftig die strategisch wichtige Vorreiterrolle in der Normung übernehmen und ausfüllen kann, ist eine verstärkte Mitarbeit auf nationaler und internationaler Ebene notwendig. Deutsche Unternehmen sollten sich aus Sicht von VDE/DKE deshalb intensiver in die deutsche, europäische und die internationale Normung einbringen. Dies eröffnet große Chancen sowohl für die beteiligten Unternehmen selbst als auch für den Industriestandort Deutschland.



Normungs-Roadmap
E-Energy/Smart-Grids 2.0



3.5.3 Normungs-Roadmap Smart Home + Building Version 2.0



Deutsche
Normungs-Roadmap
Smart Home + Building



Smart Home hat sich in den letzten Jahren als Begriff für Technologien in Wohnräumen und -gebäuden durchgesetzt, bei denen vernetzte Geräte und Systeme die Qualität des Wohnens, die Sicherheit und die effiziente Energienutzung verbessern. Gängige alternative Bezeichnungen für „Smart Home“ sind „Intelligentes Wohnen“, „eHome“ oder auch „Smart Living“.

Die anhaltende Digitalisierung und Vernetzung fast sämtlicher Bereiche menschlicher Erlebniswelt führt auch in häuslicher Umgebung zu Veränderungen, die neue Möglichkeiten beim Wohnen und Arbeiten mit sich bringen. Smart Home bettet sich in die Bemühungen um die nachhaltige Entwicklung der Infrastruktur und Verbesserung der Lebensqualität im urbanen Raum ein. Dies umfasst Bereiche wie die Ökonomie, die Lebens- und Arbeitsumgebung, das soziale Umfeld, die Mobilitätsunterstützung oder den Umgang mit den Behörden. Bei Smart Home geht es um die Integration und Nutzung von Informations- und Telekommunikationstechnologien in der heimischen Umgebung, die eine neue Erfahrungswelt ermöglichen und bekannte Aktivitäten bei Unterhaltung, Komfort, Energiemanagement, Sicherheit und Gesundheit kosteneffizienter oder bequemer machen.

Die Mitglieder der Smart-Home-Standardisierungsbemühung setzen sich zusammen aus Vertretern akademischer Einrichtungen und Industrieunternehmen der Bereiche Heimautomatisierung, Heizung, Lüftung, Klima, Kältetechnik (HLKK), Unterhaltungselektronik, dezentrale Energieversorgung und Energiemanagement sowie Systemintegratoren oder Anbietern von Sicherheitstechnik. Das Konsortium hat das Ziel, eine internationale Standardfamilie zu schaffen und zu unterhalten, die die nachhaltige Entwicklung von interoperablen, sicheren, portablen und wieder verwendbaren Anwendungen und Diensten in der Heimumgebung ermöglicht.

Deutschlands Haushalte und die Smart-Home-Wirtschaft fit für die digitale Welt zu machen, ist das Ziel der Normungs-Roadmap „Smart Home + Building Version 2.0“. Die zweite Version setzt an einem neuralgischen Punkt an. Es existieren zwar bereits viele Smart-Home-Lösungen am Markt, diese sind allerdings meist nur für einen einzelnen Anwendungsbereich optimiert und ermöglichen keinen ganzheitlichen Lösungsansatz. Hier will die Normungs-Roadmap Abhilfe schaffen – und so den Weg zu ganzheitlichen Smart-Home-Lösungen ebnen und Deutschland zum Leitmarkt im Bereich Smart Home machen. „Flexibilität des Systems, Interoperabilität über System- und Technologie-Grenzen hinweg sowie Informationssicherheit und Datenschutz sind die zentralen Anforderungen, die Smart-Home-Lösungen zukünftig erfüllen müssen, um in dem sich abzeichnenden Massenmarkt nachhaltig erfolgreich zu sein“, so das Credo der Normungs-Roadmap.

Im Projekt Smart Home + Building werden die Begriffe Smart Home, Domäne und Use Cases definiert. Als Domäne werden Anwendungsgruppen, wie z. B. Energiemanagement, Sicherheit, Entertainment und AAL, identifiziert. Use Cases (Anwendungsfälle) beschreiben Akteure, Vorgänge und Aktivitäten aus Sicht der Aufgabenstellung und abstrahieren technische Details.

Die zentrale Aufgabe der DKE ist die Sammlung, Koordinierung und Aufbereitung von Use Cases bzw. User Stories im Umfeld von Smart Home + Building. Ziel ist außerdem eine domänenübergreifende Abstimmung der bereits vorhandenen Aktivitäten auch auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene. Aus den jeweiligen Use Cases werden technische Anforderungen abgeleitet, die dann in den betroffenen Bereichen in Normen und Standards umgesetzt werden. Use Cases bilden so in einem frühen Stadium der Normung und Standardisierung Vorgänge und Umsetzungspläne ab, die dann noch systemisch umzusetzen sind.

3.5.4 Normungs-Roadmap AAL (Active Assisted Living) Version 2.0

AAL entwickelte sich erst vor wenigen Jahren als ein eigenständiges Forschungs- und Arbeitsgebiet, wurde dann aber in kurzer Zeit von zahlreichen nationalen und europäischen Akteuren aufgegriffen und vorangetrieben. Charakteristisch für AAL sind eine hohe Interdisziplinarität und daraus resultierend die Vielzahl beteiligter Partner aus verschiedenen medizinischen, technologischen, soziologischen und wirtschaftlichen Bereichen. Damit einher geht eine Vielzahl von Spezifikationen, die heute bereits für die Einzelsysteme existent und anwendbar sind. Das Vorhandensein dieser Spezifikationen allein genügt jedoch noch nicht, um den spezifischen Anforderungen der AAL-Systeme und -Produkte gerecht zu werden. Notwendig ist, aus den vorhandenen Spezifikationen diejenigen zu identifizieren und auszuwählen, die tatsächlich systemrelevant sind.

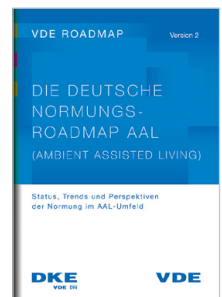
Voraussetzung für die breite Einführung vernetzter Gesundheitstechnologien und assistiver Technologien sind sichere, einfache und interoperable Systeme, die einen messbaren Nutzen für die Anwender haben. Es gilt, vorhandene Lücken – insbesondere hinsichtlich der Integration und Interoperabilität der Einzelsysteme, aber auch etwa bezüglich der Ausbildung von Fachkräften und der Qualitätssicherung – zu schließen. So stellt das Zusammenführen der unterschiedlichen Beteiligten und die Bewältigung neu entstandener Hürden durch neue Berührungspunkte und Schnittstellen eine Herausforderung dar. Mit Blick auf die Schnittstellengestaltung zwischen unterschiedlichen Netzwerken, aber auch technischen Geräten und Systemen, resultiert stellenweise ein Bedarf an (systematischer) Standardisierung und Normung.

Ein übergreifendes Verständnis und eine allgemeine Sichtweise der unterschiedlichen Akteure muss weiter unterstützt werden. Die deutsche Normungs-Roadmap AAL Version 2.0 fördert das gemeinsame Verständnis aller Beteiligten im AAL-Umfeld und sensibilisiert diese für andere Bereiche. Die weiteren Entwicklungen der deutschen Normungs-Roadmap AAL werden mit den betroffenen Gremien, Normenausschüssen sowie interessierten Fachkreisen diskutiert und fortgeschrieben.

In der Aufführung der Smart-Home-Domänen findet sich auch die AAL-Umgebung wieder. Ihre Infrastrukturen überschneiden sich in einigen Fällen. Aus diesem Grund muss eine enge Zusammenarbeit zwischen diesen Bereichen stattfinden. Durch geeignete Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit können Synergieeffekte mit den Bereichen intelligente Zähler (en: Smart Meters) und Heimautomation (en: Smart Home) ausgearbeitet werden. Assistive Technologie bezieht sich im Allgemeinen auf diejenige Technik, die Anwendern ermöglicht, Aufgaben und Bewegungen vereinfacht bzw. autonom durchzuführen, die sie ohne diese technischen Unterstützung nicht durchführen könnten. Installierte Sensoren im Haus können Aktivitäten aufzeichnen und benötigte Unterstützung anfordern. Der Einsatz vernetzter Gesundheits- und Smart Home Technologien bietet eine bedarfsgerechte Förderung, Unterstützung oder Erhaltung der Selbstständigkeit von Personen in ihrem häuslichen Umfeld. Diese Verbindung zwischen assistiver Technik und Smart-Home-Anwendungen besteht z. B. in der Anbindung von Sensoren an Entertainment-Anwendungen (z. B. durch Gestensteuerung).

Die anschließende Vernetzung des Gesundheitswesens ist von hoher gesellschaftlicher Relevanz sowohl aus Sicht des einzelnen Bürgers, als auch aus Sicht der deutschen Gesundheitswirtschaft und führt zu einer höheren Effizienz und Qualität der medizinischen Versorgung.

Das AAL-Umfeld ist allerdings nicht nur auf das häusliche Umfeld begrenzt, sondern bezieht das Umfeld des Betroffenen ein, wenn dieser mobil ist und das Haus verlässt.



Deutsche
Normungs-Roadmap
AAL



3.5.5 Normungs-Roadmap Energiespeicher

Die von der Bundesregierung ausgerufenen Ziele der Energiewende sind ambitioniert: Der Verbrauch von Primärenergie und die Emission von Treibhausgasen sollen drastisch gesenkt werden. Der Anteil der erneuerbaren Energien am Energieverbrauch soll bis in das Jahr 2050 kontinuierlich gesteigert werden.

Die im Rahmen der Energiewende entwickelten und erprobten Technologien sind Voraussetzung für eine erfolgreiche Zukunft des Standortes Deutschland. Bei der Umsetzung der Energiewende werden die Rahmenbedingungen durch die Faktoren Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit vorgegeben.

Eine zentrale Herausforderung, die die Energiewende mit sich bringt, ist der räumliche und zeitliche Ausgleich von Angebot und Nachfrage von Energie, durch die Nutzung großer Anteile von volatil erzeugtem, erneuerbaren Strom. Energiespeicher stellen eine Flexibilisierungsoption dar, die vor allem den zeitlichen Ausgleich von Angebot und Nachfrage gewährleistet.

Der Fokus der öffentlichen Diskussion zu Energiespeichern liegt oft auf der Speicherung von elektrischer Energie, z. B. mittels Batterien. Die Normungs-Roadmap behandelt alle Speichertechnologien, die im Kontext der Energiewende als relevant anzusehen sind. Dabei reicht die Bandbreite von thermischen Speichern, über elektrochemische bzw. Batterie Speicher, chemische Speicher, wie z. B. Power-to-Gas, bis hin zu mechanischen Speichern, wie z. B. Pumpspeicherwerken.

Insbesondere aufgrund der Notwendigkeit der Verknüpfung der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität ist diese ganzheitliche Betrachtung erforderlich. Die Normungs-Roadmap beinhaltet die Darstellung des aktuellen Standes der Normung in den verschiedenen Sektoren und daraus abgeleitet die notwendigen Handlungsfelder in der nahen Zukunft.

DIN, DKE, der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) und der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) haben im Dialog mit Experten der jeweiligen Gremien die Normungs-Roadmap Energiespeicher erarbeitet, die in regelmäßigen Abständen aktualisiert und bewertet wird.

4 WIRTSCHAFTLICHE UND RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

4.1 Markt

Im Zuge der Energiewende wächst die Bedeutung von auf Gleichstrom basierenden Anwendungen wie der PV oder der Elektromobilität. Gleichzeitig steigert der wachsende Bedarf nach immer mehr Rechenleistung und Speicherkapazität auch den Gleichstrombedarf von Rechnern, Servern oder von Endgeräten wie Smartphones und Tablets. Selbst die Bordnetze von Flugzeugen sind zumindest in Teilen in Gleichspannungstechnik ausgeführt.

Die Marktentwicklung ist zurzeit schwer abzuschätzen, weil derzeit nur Nischenapplikationen entstanden sind. Es ist in den nächsten Jahren mit einem signifikanten Marktanstieg zu rechnen. Insbesondere deshalb, weil die zukünftigen Speichertechnologien deutlich komplexere Gleichstromanwendungen ermöglichen.

Eine dieser Nischen sind die Rechenzentren: Die Zahl der mit 380 V-Gleichstrom betriebenen Rechenzentren hat in den letzten Jahren zugenommen.

4.1.1 LVDC als Lösungsbeitrag für gesellschaftliche Herausforderungen

Eine der großen gesellschaftlichen Herausforderungen ist die Energiewende. Die zurzeit in Deutschland bereits gängige Möglichkeit zur dezentralen Energieversorgung und Speicherung soll in Zukunft in Ländern wie z. B. Indien, Afrika, möglicherweise auch in Südamerika eventuell ausschließlich über Gleichstrom erfolgen. Dies ist aus wirtschaftlicher und geographischer Sicht in diesen, jedoch auch in nordischen Ländern wie Teilen von Skandinavien, gar nicht anders realisierbar, denn nur mit Gleichstrom ist eine größere Reichweite und höhere Leistung mit/über dasselbe Kabel/Leitung möglich.

Die Nutzung von Gleichstromsystemen ist in Schwellenländern in vielen Bereichen denkbar: So wird z. B. in Indien 20 % der elektrischen Energie für Bewässerungspumpen benötigt. Diese Systeme sollen auf dezentrale Gleichstromlösungen mit PV umgestellt werden, die sich innerhalb von drei Jahren amortisieren.

4.1.2 Die Vielfalt der Branchen und Domänen im LVDC-Markt

Welche Branchen und Domänen der LVDC-Markt in Zukunft bedienen wird, ist zurzeit eher spekulativ. Jedoch gibt es schon heute erste Ansätze und Bereiche, die bereits Gleichstromsysteme nutzen. Betrachten wollen wir hier zwei Gruppen von Domänen: Mobilität und Gebäude.

In der Mobilität werden Gleichstromsysteme für den Antrieb und die Steuerung von elektrischen Antrieben bei Schiffen, Lastkraftwagen, im Öffentlichen Nahverkehr, Flugzeugen und Baumaschinen verwendet. Hier sind fahrzeugeigene Gleichstromnetze inklusive Antriebs- und Automatisierungssysteme eingebaut.

Die Vorteile der Nutzung von Gleichstromsystemen sind:

- Reduzierung des Primärenergiebedarfes,
- verbesserte Dynamik und Mobilität,
- einfachere Integration alternativer Energiequellen,
- weniger Komponenten,
- deutliche Geräuschreduzierung,
- flexiblere Platzierung der Komponenten.

Als Gebäude ist hier jede Art vom modernen Gebäude und auch die Nachrüstung bestehender Gebäude gemeint. In Tabelle 2 sind beispielhaft unterschiedliche Technologien in Gebäuden aufgeführt, die mit Gleichstrom realisierbar sind. Zusätzlich sind die Vorteile dieser Technologien und mögliche Anwendungsgebiete dargestellt.

TECHNOLOGIE	VORTEILE	ANWENDUNGSGEBIETE
LED-Beleuchtung	• Reduzierung des Energieverbrauchs • Reduzierung des Platzbedarfs • Reduzierung des Gewichtes der Ausrüstung • Flexibilität bei der Platzierung der Komponenten • Integrierte Digitalsteuerung z. B. PoE	• Büro • Geschäftslokal • Datacenter/IKT • Heim • Wohnhaus • Krankenhaus • Fabrik • Außenbeleuchtung
Batteriespeichersysteme (z. B. USV Systeme)	• Reduktion von Wandlerstufen	• Büro • Geschäftslokal • Datacenter/IKT • Wohnhaus • Fabrik
Integration von erneuerbaren Energiequellen	• Reduktion von Wandlerverlusten • optimierte Nutzung erneuerbarer Energien	• Büro • Geschäftslokal • Datacenter/IKT
Stromversorgung für elektronische Geräte	• höhere Energieübertragung mit identischen Leitungsquerschnitten	• Büro • Geschäftslokal • Datacenter/IKT • Heim • Krankenhaus
Verteilung von DC	• höhere Energieübertragung mit identischen Leitungsquerschnitten • Zunehmende Marktdurchdringung intelligenter Komponenten dank elektronischer Wandlertechnik	

Tabelle 2 – Anwendungen in Gebäuden

4.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen und Festlegungen

4.2.1 Energiewirtschaftsgesetz – EnWG

Das deutsche Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung wurde zuletzt 2005 neu gefasst. In dem erstmals 1935 in Kraft getretenen Gesetz sind grundlegende Regelungen zum Recht der leitungsgebundenen Energie mit dem Ziel die Allgemeinheit mit möglichst effizientem, sicheren und preisgünstigem Strom und Gas zu versorgen. Hierbei soll in Zukunft vermehrt auf erneuerbare Energien gesetzt werden.

Zusätzlich soll das Energiewirtschaftsgesetz zur „Sicherstellung eines wirksamen und unverfälschten Wettbewerbs bei der Versorgung mit Elektrizität und Gas und der Sicherung eines langfristig angelegten leistungsfähigen und zuverlässigen Betriebs von Energieversorgungsnetzen“ dienen [14].

In Teil 6 „Sicherheit und Zuverlässigkeit der Energieversorgung“ wird im § 49 „Anforderungen an Energieanlagen“ auf die Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik und der technischen Regeln des Verbandes der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. hingewiesen.

4.2.2 Niederspannungsanschlussverordnung (NAV)

In der Verordnung über Allgemeine Bedingungen für den Netzanschluss und dessen Nutzung für die Elektrizitätsversorgung in Niederspannung werden neben allgemeinen Vorschriften wie z. B. Netzanschlussverhältnis und des Anschlussnutzungsverhältnisses, auch der Netzanschluss und die Anschlussnutzung geregelt. Des Weiteren werden Anlagenbetrieb und Rechte des Netzbetreibers ebenso beschrieben wie Fälligkeiten, Folgen von Zuwiderhandlungen und Beendigungen der Rechtsverhältnisse.

Im § 7 „Art des Netzanschlusses“ wird die Spannung am Ende des Netzanschlusses von 400 V bzw. 230 V bei Drehstrom und 230 V-Wechselstrom festgelegt. Gleichstrom wird in diesem Zusammenhang nicht erwähnt. Die Stromart ist jedoch generell frei wählbar.

4.2.3 Niederspannungs-Richtlinie (LVD)

Die Richtlinie dient der Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt. Sie gilt für elektrische Betriebsmittel zur Verwendung bei Nennspannung zwischen 75 und 1 500 V für Gleichstrom und ist neben der EMV-Richtlinie (siehe Kapitel 4.2.4) ein wichtiges Regelwerk für die Sicherheit elektrisch betriebener Geräte.

Am 29. März 2014 wurde im Amtsblatt der Europäischen Union die neue Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU veröffentlicht. Da an der Niederspannungsrichtlinie 2006/95/EG eine ganze Reihe an Änderungen vorgenommen werden mussten, haben Europäisches Parlament und Europäischer Rat die Veröffentlichung einer Neufassung beschlossen. Mit der neuen Niederspannungsrichtlinie kommen auf die Marktteilnehmer also große Veränderungen zu. Die neue Niederspannungsrichtlinie muss ab dem 20. April 2016 angewendet werden.

4.2.4 EMV-Richtlinie

Die Richtlinie 2014/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln soll das Funktionieren des Binnenmarkts für Betriebsmittel dadurch gewährleisten, dass ein angemessenes Niveau der elektromagnetischen Verträglichkeit festgelegt wird und generell für Wechselstrom und Gleichstrom gilt.

4.3 Arbeitsschutz (Sicherheitsanforderungen, Dokumentation)

Elektromobilität

Zurzeit werden Richtlinien für die Elektromobilität ausgearbeitet bzw. bereits angewendet insbesondere bei der Produktion und Reparatur von Elektromobilen. Derzeit gilt für Gleichstrom unter anderem die Anwendung der Richtlinie der Deutschen gesetzlichen Unfallversicherung DGUV Information 200-005 (bisher: BGI/GUV-i 8686) „Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen“.

Photovoltaik

Die Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM) hat zum Thema Montage von PV- und Solaranlagen eine leicht bedienbare Software entwickelt, mit der schnell und einfach eine Gefährdungsbeurteilung durchgeführt werden kann. Denn gerade bei der Montage, Wartung und Instandhaltung von diesen Anlagen kommt es zu schweren und auch tödlichen Unfällen. Dazu gehören meistens Sturz- und Stromunfälle. Mit Hilfe der Gefährdungsbeurteilung kann der Unternehmer geeignete Maßnahmen zum Arbeitsschutz treffen.

Fahrzeugbatterien

Das Laden von Batterien kann auch bei niedriger Gleichspannung, bei Störungen in Anlagen und Arbeits- und Betriebsmitteln sowie bei Verhaltensfehlern gefährlich werden, denn hierbei können hohe Ströme auftreten, die nicht nur eine große Brandgefahr darstellen, sondern auch zu Gefahren für Personen werden können. Dies ist in der DGUV Information 209-067 (bisher: BGI 5017) „Ladeeinrichtungen für Fahrzeugbatterien“ beschrieben.

4.4 Versicherungswirtschaft

Die Versicherungswirtschaft als Risikoträger ist vielfältig von der Anwendung bestehender und neuer Technologien berührt. Hier gilt es vor allem aus den (Schadens-)Erfahrungen der Vergangenheit die richtigen Erkenntnisse für die Sicherheit der Technik zu ziehen und diese zum Nutzen der Norm und somit auch für die Anwendung von Gleichstrom im Niederspannungsbereich einzubringen.

Durch die Veröffentlichung von Publikationen durch den Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV) werden diese Erfahrungen und Erkenntnisse weiter gegeben.

Photovoltaik

Zur Auswahl, Planung, Errichtung und Betrieb von PV-Anlagen hat der GDV den technischen Leitfaden „Photovoltaikanlagen“ (VdS 3145) herausgegeben. Zielstellung ist die Minimierung von Sachschäden und

Betriebsunterbrechungen. Dabei werden brandschutztechnische, mechanische, elektrotechnische und sicherungstechnische Aspekte sowie der Einsatz von Feuerwehren in Verbindung mit PV-Anlagen behandelt.

Elektromobilität

Um Planern, Errichtern und Betreibern einen Überblick über die verschiedenen Ladebetriebsarten für Elektrostraßenfahrzeuge zu geben, wurde vom GDV die Publikation „Ladestationen für Elektrostraßenfahrzeuge“ (VdS 3471) herausgegeben. Es werden Hinweise gegeben zu den verschiedenen Lademöglichkeiten und den verschiedenen Umgebungen, in denen Ladestationen betrieben werden.

5.1 Sicherheitsbegriff

Die Schutzziele und Schutzkonzepte sind dazu bestimmt, die Sicherheit von Personen, Nutztieren und Sachwerten hinsichtlich der Gefahren und Schäden bei Anwendung von DC sicherzustellen, die bei bestimmungsgemäßem Gebrauch elektrischer Anlagen oder Geräten entstehen können.

Folgende Risiken müssen u. a. betrachtet werden:

- gefährliche Körperströme,
- überhöhte Temperaturen, die möglicherweise Verbrennungen, Brände und andere schädliche Einflüsse verursachen können,
- Überstrom,
- Unterspannungen, Überspannungen und elektromagnetische Einflüsse, die wahrscheinlich eine Verletzung oder eine Schädigung hervorrufen,
- Unterbrechung der Stromversorgung,
- Lichtbögen.

5.2 Personengefährdung durch Gleichstrom und Schutz gegen elektrischen Schlag

5.2.1 Einführung

Im Bereich der Niederspannung spielt die elektrische Sicherheit eine besondere Rolle, da die meisten Geräte in diesem Spannungsbereich von Laien bedient und betrieben werden. In den letzten Jahren haben sich Gleichstromanwendungen mit hohen Betriebsspannungen und somit auch mit hohen Berührungsspannungen durchgesetzt. Durch PV-Anlagen oder Batteriespeicher, wie sie u. a. in der Elektromobilität Anwendung finden, existieren mittlerweile zahlreiche elektrische Anlagen mit einer Nennspannung oberhalb der zulässigen Berührungsspannungsgrenze DC von 120 V. Im Bereich der versorgenden Infrastruktur haben sich Gleichstromsysteme bislang nur in Rechenzentren etabliert. Derzeit wird auch im Bereich der kommerziellen Gebäudenutzung die Anwendung von Gleichstromsystemen erwogen.

ANWENDUNG	NENNSPANNUNG IN VOLT
solarbetriebene Gartenleuchten u. ä.	12
Telekommunikation (International, Europa, Deutschland)	48/60
Bahnübergangssicherungseinrichtungen	36/48
Straßenbahnen, U-Bahnen, Oberleitungs-Omnibus	600 oder 750
Bahn Signaltechnik (Deutschland)	48/60
Elektromobilität (derzeit)	48/200-800
Elektromobilität (perspektivisch)	bis 1 500
Rechenzentren	380
Gebäudeinfrastruktur am Beispiel DCC+G aktive Leiter (+/-)	760
aktive Leiter gegen Bezugsleiter (Erde)	380
PV-Anlagen	24/48/ bis 1 500
Versorgungsnetze auf Schiffen	1 000
Notstromsysteme und Sicherheitsstromversorgung	220

Tabelle 3 – Anwendungen und Nennspannungen

Der elektrische Schlag beim Berühren und der mögliche Lichtbogen stellen die Hauptgefahren für den Menschen und Nutztiere dar. Welche besonderen Gefährdungen von hohen Berührungsspannungen in Gleichstromnetzen ausgehen, wurde bislang nicht näher betrachtet. Deshalb haben VDE|DKE und Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V. ein gemeinsames Forschungsprojekt ins Leben gerufen, mit dem das Ziel verfolgt wurde, den Erkenntnisstand über die Wirkung von Gleichstrom auf den menschlichen Körper zu verbessern und die Aussagen in der Normung zu überprüfen.

5.2.2 Wirkungen elektrischer Gleichströme auf den Menschen

Eine sensible Wahrnehmung tritt bei kleinen Strömen bereits beim Berühren oder Loslassen unter Spannung stehender Teile auf. Die Stromänderung im Moment des Berührens oder Loslassens wird deutlich empfunden. Aber auch während der Durchströmung kommt es zu sensiblen Wahrnehmungen. Der Grund dafür liegt in der Reizung sensibler Nerven in der Haut. An der Kontaktstelle wird ein Kribbeln wahrgenommen, das sich mit steigender Stromstärke zu einem schmerzhaften Stechen verändert (Tabelle 4). Zum Vergleich: In der Medizin wird die schmerzlindernde und durchblutungsfördernde Wirkung des Gleichstromes bereits seit langem therapeutisch genutzt. Die Dosis (Stromdichte) wird dabei so festgelegt, dass ein leichtes, schmerzloses

Kribbeln empfunden wird. Die Stromdichte liegt üblicherweise im Bereich (0,05 bis 0,2) mA/cm² [16]. Für die Handinnenflächen (etwa 100 cm²) bedeutet dies eine Stromstärke von (5 bis 20) mA.

Neben der Wahrnehmung durch die Stimulation sensibler Nerven kommt es auch zur Reizung motorischer Nerven. Insbesondere der Beginn und das Ende der Durchströmung (der Berührung) führen zu einer Reizung der motorischen Nerven, die auf den Muskel übertragen wird. Somit kommt es nur bei der o. g. zeitlichen Änderung der Stromstärke zu einer kurzen Muskelkontraktion. Diese Zuckung führt dazu, dass sich der Betroffene von der Berührungsstelle löst oder sogar weggeschleudert wird. Damit sind häufig Verletzungen des Bewegungsapparates verbunden. Aus diesem Mechanismus ergibt sich jedoch keine Loslassschwelle, wie sie beim Wechselstrom berücksichtigt werden muss.

STROMSTÄRKE IN mA	EMPFINDUNGEN GLEICHSTROM
bis 2	keine
7	leichtes Kribbeln
12	Wärmegefühl und verstärktes Kribbeln in den Handflächen, leichter Druck in den Handgelenken
21	starker Druck bis Stechen in den Handgelenken
27	Kribbeln im Unterarm, Druckschmerz in den Handgelenken, stechender Schmerz in Handgelenken, Wärmegefühl
32	verstärkter Druckschmerz in Handgelenken, Kribbeln bis in die Ellenbogen reichend
35	heftige Druckschmerzen in Handgelenken, stechende Schmerzen in den Händen
43	sehr starker Druckschmerz in Handgelenken, heftig ziehende und stechende Schmerzen in den Händen, höchstens 10 s auszuhalten

Tabelle 4 – Empfindungen bei einer Durchströmung Hand-Hand, Berührungsfläche je ca. 90 cm² nach Osypka [17]

Bei einem Gleichstromunfall besteht auch die Gefahr des Herzkammerflimmerns. Deshalb wurden in der Vergangenheit Tierversuche zur Ermittlung von Schwellenwerten durchgeführt. Die Flimmerschwelle für Gleichstrom besitzt, ebenso wie die des Wechselstromes, ein oberes und ein unteres Niveau. Dies deutet darauf hin, dass auch bei Gleichströmen Extrasystolen im Herzen hervorgerufen werden, die einen Wiedereintritt und damit das Herzkammerflimmern begünstigen. Neben dem Reiz beim Ein- und Ausschalten bewirkt der Gleichstrom während der Durchströmung einen Automatismus der Herzmuskelzellen [18], was unmittelbar zur Ausbildung von Extrasystolen führt. Der Wiedereintritt als Ursache für das Herzkammerflimmern wird begünstigt, sodass mit der Durchströmungsdauer und der Anzahl der Extrasystolen die Wahrscheinlichkeit für das Herzkammerflimmern steigt. Dementsprechend sinkt die Flimmerschwelle mit der Durchströmungsdauer auf ein unteres Niveau ab. Der Vergleich der Flimmerschwellen von Gleich- und Wechselstrom zeigt, dass sich bei kurzen Durchströmungen die Schwellenwerte praktisch nicht unterscheiden. Bei längeren Durchströ-

mungen ist die Flimmerschwelle bei Gleichstrom dagegen höher als beim Wechselstrom. Im Jahr 2018 werden entsprechende ergänzende Untersuchungen zur Überprüfung der Herzkammerflimmerschwellen beginnen.

Bei längeren Durchströmungen, beispielsweise bei eingeklemmten Personen, müssen auch elektrochemische Wirkungen berücksichtigt werden. An den Berührungsstellen kann es zu Verätzungen der Haut kommen. Nicht selten unterschieden sich deshalb die Strommarken an den Berührungsstellen. Infolge des Gleichstromes können auch die elektrisch geladenen Blutzellen zur Auflösung gebracht werden (Hämolyse). Das dabei freigesetzte Hämoglobin kann in der Folge zu Nierenschäden führen. Auch die Zersetzung der Muskulatur (Rhabdomyolyse) kann durch die Freisetzung vom Myoglobin im Blut die Nieren schädigen. Schwellenwerte für diese elektrochemischen Wirkungen sind bislang nicht bekannt. Lange Durchströmungsdauern von einigen Minuten stellen einen Sonderfall dar, da diese nur bei eingeklemmten oder bewusstlosen Personen zu erwarten sind.

5.2.3 Ergebnisse des Projektes DC-Sich und weiterer Forschungsbedarf

Der Kenntnisstand zu den Wirkungen des elektrischen Gleichstromes auf den Menschen und Nutztiere ist je nach Wirkung sehr unterschiedlich (Tabelle 5). Während die physiologische Basis oftmals bekannt ist, fällt die experimentelle Bestätigung wegen der hohen Auflagen für Tierversuche oft schwer. Eine Ableitung von sinnvollen Schwellenwerten ist jedoch ohne experimentelle Untersuchungen nicht möglich. Während Versuche zur Wahrnehmung einfach an Versuchspersonen durchgeführt werden können, verbieten sich Versuche zur Flimmerschwelle am Menschen..

WIRKUNGEN	PHYSIOLOGISCHE BASIS BEKANNT	EXPERIMENTELL BESTÄTIGT	SCHWELLENWERTE EXISTIEREN
Wahrnehmung	✓	✓ (Mensch)	✓
Muskelkontraktion (Verkrampfung, Tetanus)	✗	✗	✗
Herzkammerflimmern	✓ (unvollständig)	✓ (Tierversuche)	✓
Elektrochemische Effekte			
Verätzungen	✓	✓	✗
Hämolyse	✓	✗	✗

Tabelle 5 – Übersicht zum Stand der Wissenschaft zu den Wirkungen des elektrischen Gleichstromes

Bislang konnte eine andauernde Verkrampfung der Muskulatur nur bei einigen wenigen Unfällen beobachtet werden. Die vorliegenden Hinweise lassen deshalb keine Ableitung eines Schwellenwertes für eine Loslasschwelle bei Gleichstrom zu. Die Ergebnisse der Recherchen belegen jedoch, dass eine Muskelverkrampfung aus physiologischer Sicht auch bei Gleichstrom möglich ist. Für weiterführende Aussagen sind auf diesem Gebiet deshalb weitere Untersuchungen nötig.

Für elektrochemische Wirkungen liegen bislang keine Schwellenwerte vor. Dafür fehlen teilweise auch die nötigen experimentellen Untersuchungen. Obwohl davon auszugehen ist, dass elektrochemische Wirkungen nur bei langen Durchströmungen auftreten, sollten Schwellenwerte abgeleitet und in die Normung aufgenommen werden.

5.3 Schutz bei Überstrom

Schutzeinrichtungen müssen vorgesehen werden, um jegliche Überströme in den Leitern des Stromkreises zu unterbrechen, bevor solch ein Strom durch schädliche thermische oder mechanische Auswirkungen auf die Isolierung, Verbindungen, Anschlüsse oder Umgebung der Leiter eine Gefahr hervorrufen kann.

Die Anforderungen der DIN VDE 0100-430 (VDE 0100-430) sind anzuwenden.

5.4 Schutz bei Überspannung

Zum Schutz von Personen und Anlagen ist nach DIN VDE 0100-443 (VDE 0100-443) der Schutz gegen Überspannungen infolge der atmosphärischen Einflüsse zu bewerten und zu berücksichtigen. Die wichtigsten Einflussfaktoren stellen hierbei der Standort und die notwendige Verfügbarkeit der Einrichtungen dar. Die Auswahl der geforderten Überspannung-Schutzeinrichtungen (SPDs) ist in der DIN VDE 0100-534 (VDE 0100-534) geregelt. Besteht eine Gefährdung durch direkte Blitzeinschläge, sind zusätzlich die Blitzschutz-Normen der Reihe DIN EN 62305 (VDE 0185-305) heranzuziehen. Für den Schutz von baulichen Anlagen mit elektrischen und elektronischen Systemen, besonders wenn hohe Anforderungen an deren Funktions- und Versorgungssicherheit gestellt werden, muss darüber hinaus auch der Schutz dieser Systeme gegen leitungsgebundene und gestrahlte Störungen sichergestellt werden. Störungen dieser Art entstehen durch den elektromagnetischen Blitzimpuls (LEMP; en: Lightning Electromagnetic Pulse) bei direkten und indirekten Blitzeinschlägen. Diese Forderung kann durch ein LEMP-Schutzsystem nach DIN EN 62305-4 (VDE 0185-305-4) erfüllt werden. Um ein durchgängiges und funktionierendes Überspannungsschutzkonzept zu erreichen, muss zudem die energetische Koordination zwischen den SPDs nach DIN EN 62305-4 (VDE 0185-305-4) sichergestellt sein.

In der DIN VDE 0100-534 (VDE 0100-534) werden Anforderungen für die Auswahl und Errichtung von SPDs zur Begrenzung von solchen transienten Überspannungen beschrieben. Durch SPDs soll eine Begrenzung von transienten Überspannungen sichergestellt werden, um die Anforderungen an die Isolationskoordination unter den Bedingungen, wie sie in DIN EN 60664-1 (VDE 0110-1) beschrieben sind, zu erfüllen. Die DIN VDE 0100-534 (VDE 0100-534) berücksichtigt dabei transiente Überspannungen, die sowohl atmosphärischen Ursprungs sind, als auch Schaltüberspannungen, die von Betriebsmitteln selbst innerhalb der elektrischen Anlage erzeugt werden. Dabei ist in DIN VDE 0100-534 (VDE 0100-534), im Gegensatz

zur DIN VDE 0100-443 (VDE 0100-443), explizit auch der Schutz bei transienten Überspannungen, die durch direkte Blitzeinschläge oder durch Blitzeinschläge in der unmittelbaren Umgebung eines durch ein Blitzschutzsystem geschützten Gebäudes verursacht werden, eingeschlossen. Die Anforderungen der DIN VDE 0100-534 (VDE 0100-534) beziehen sich auf SPDs für Wechselstromnetze. Sie können aber, soweit anwendbar, auch für den Einsatz von SPDs in Gleichstromnetzen herangezogen werden.

Mit einer TOV-Spannung (en: Temporary Over Voltage) werden netzfrequente zeitweilige (temporäre) Überspannungen bezeichnet, die aufgrund von Fehlern innerhalb des Mittelspannungs- und Niederspannungsnetzes entstehen können. Die Produkt- und Errichtungsnormen für SPDs in Niederspannungsverbraucheranlagen fordern eine Festigkeit gegenüber TOV (TOV-Festigkeit). Temporäre Überspannungen in den bekannten Normen beziehen sich somit auf AC-Netze. Wie sich dies in DC-Netzen verhält, ob und in welcher Form dort Temporäre Überspannungen auftreten, ist noch im Detail zu verifizieren. Mögliche Beispiele hierzu sind die Sonderbedingungen bei Starkladung batteriegespeicherter Stromversorgungen (siehe Abbildung 3, wobei an die Batteriespannung angeschlossene Geräte durch die erhöhte Ladespannung nicht beeinträchtigt werden dürfen) oder vergleichbare Anforderungen aus den USA hinsichtlich Power Crossing (AC-Kopplung auf DC-Seite im Fehlerfall) in Datennetzen. Hinweise hierzu siehe auch Kapitel 7.3 LVDC-Erzeugung am Beispiel der Photovoltaik im Absatz zu batteriegespeisten DC-Quellen.

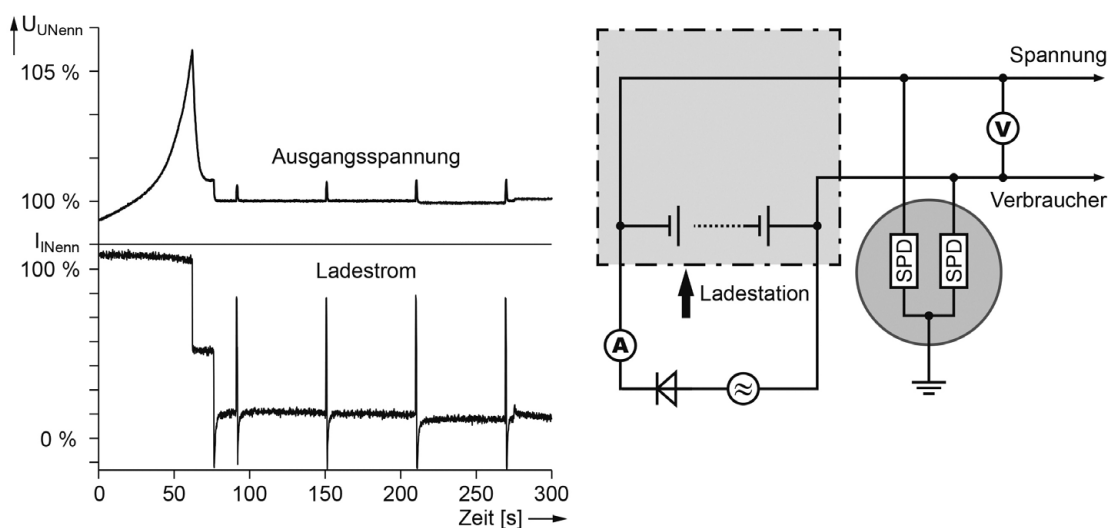


Abbildung 3 – Starkladung batteriegespeicherter Stromversorgungen [19]

5.5 Funktionale Sicherheit auf Systemebene

5.5.1 Was versteht man unter „Funktionaler Sicherheit“

Das aus der DIN EN 61508 (VDE 0803) hervorgehende Beiblatt 1 (VDE 0803 Beiblatt 1) beschreibt in Abschnitt 3.1, was „Funktionale Sicherheit“ ist:

„Wir beginnen mit einer Definition der Sicherheit. Dies ist die Freiheit von unvermeidbaren Risiken der physischen Verletzung oder Schädigung der Gesundheit von Menschen, entweder direkt oder indirekt als ein

Ergebnis von Schäden an Gütern oder der Umwelt.

Funktionale Sicherheit ist der Teil der Gesamtsicherheit, der davon abhängig ist, dass ein System oder ein Betriebsmittel korrekte Antworten auf seine Eingangszustände liefert.

Ein Übertemperatur-Schutzgerät, das Temperatursensoren in den Wicklungen eines elektrischen Motors verwendet, um den Motor abzuschalten, bevor er sich überhitzen kann, ist ein Beispiel für Funktionale Sicherheit. Das Bereitstellen einer speziellen Isolierung, um hohen Temperaturen standzuhalten, ist kein Beispiel für Funktionale Sicherheit, obwohl es immer noch ein Beispiel für Sicherheit ist und gegen genau die gleiche Gefährdung schützen könnte.

Weder Sicherheit noch Funktionale Sicherheit kann ohne Beurteilung der Systeme als Ganzes und der darauf einwirkenden Umwelt bestimmt werden.“

5.5.2 Das System Elektroinstallation

Bei der Anwendung der Niederspannung besteht die Gefahr, dass ein Mensch im Fehlerfall getötet oder verletzt werden kann. Um den Fehlerfall weitestgehend in der Elektroinstallation auszuschließen, werden in Abhängigkeit von der Umgebung/Art der Installation, folgende Maßnahmen angewendet:

- Basisschutz,
- Fehlerschutz,
- zusätzlicher Schutz,
- Schutzpegelerhöhung.

Da es für die Elektroinstallation keine eigene Norm zum Thema „Funktionale Sicherheit“ gibt, nutzt diese Betrachtung Normen, welche thematisch naheliegend sind.

5.5.3 Normative Verweisungen

Wichtige Normen im Bereich der Funktionalen Sicherheit sind folgende:

- DIN EN 61140 (VDE 0140-1); „Schutz gegen elektrischen Schlag – Gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel“,
- DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410) „Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 4-41: Schutzmaßnahmen – Schutz gegen elektrischen Schlag (IEC 60364-4-41:2005, modifiziert)“,
- DIN EN ISO 13849-1 „Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsgrundsätze (ISO 13849-1:2006)“,
- DIN EN 50495 (VDE 0170-18) „Sicherheitseinrichtungen für den sicheren Betrieb von Geräten im Hinblick auf Explosionsgefahren“,
- DIN EN 61508-2 (VDE 0803-2) „Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/ programmierbarer elektronischer Systeme – Teil 2: Anforderungen an sicherheitsbezogene elektrische/ elektronische/ programmierbare elektronische Systeme“,
- DIN IEC/TS 60479-1 (VDE V 0140-479-1) „Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere – Teil 1: Allgemeine Aspekte“,

- DIN EN 61557-15 (VDE 0413-15:2014-10) – Teil 15: „Anforderungen zur Funktionalen Sicherheit von Isolationsüberwachungsgeräten in IT-Systemen und von Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche in IT-Systemen“.

Zum Erreichen der Funktionalen Sicherheit sind Normen unumgänglich. In einer Auswahlreihe des VDE-Verlages ist eine Zusammenstellung der meisten hierfür erforderlichen Normen zu finden:

<http://www.vde-verlag.de/normen/auswahl-zur-funktionalen-sicherheit.html>

Weitere wichtige Normen und VDE-Vorschriften, auf die zum Beispiel aus den Normen zur funktionalen Sicherheit verwiesen wird, können auf den Webseiten des VDE- und Beuth-Verlages recherchiert und bestellt werden.

<http://www.dke.de/de/findenbeziehen/Seiten/findenbeziehen.aspx>

Im Folgenden sind Informationen zu einzelnen Normen und Normvorhaben zur funktionalen Sicherheit und aus deren Umfeld aufgeführt:

- Die Software für Eisenbahnsteuerungs- und Überwachungssysteme behandelt die DIN EN 50128 (VDE 0831-128).
- Die DIN EN 61131-6 (VDE 0411-506) dient zur Anwendung der Grundsätze der DIN EN 61508 (VDE 0803-1) bei der Auslegung sicherheitsgerichteter SPS-Gerätetechnik.
- Für Analysezwecke kann die Ereignisbaumanalyse herangezogen werden. Sie ist in DIN EN 62502 (VDE 0050-3) beschrieben.
- Spielt bei der Aufrechterhaltung der Sicherheitsfunktion eine Mensch-Maschine-Schnittstelle eine Rolle, so kann DIN EN 62508 (VDE 0050-2) Hinweise zu deren Gestaltung geben.
- Das Beiblatt 1 zur DIN EN 61508 (VDE 0803 Beiblatt 1 und IEC/TR 61508-0:2005) führt in das Konzept der funktionalen Sicherheit ein und gibt einen Überblick über die Normenreihe.

5.5.4 Begriffe aus der DIN EN 61140 (VDE 0140-1)

In der DIN EN 61140 (VDE 0140 1) ist eine ganze Reihe an Begriffen definiert, damit über alle Rubriken eine eindeutige Sprache möglich ist:

- **Basisschutz:** Schutz gegen elektrischen Schlag, wenn keine Fehlzustände vorliegen [IEV 195-06-01]
ANMERKUNG: Basisschutz entspricht für Anlagen, Systeme und Betriebsmittel der Niederspannung im Allgemeinen dem Schutz gegen direktes Berühren, wie er in IEC 60364-4-41 angewendet wird.
- **Fehlerschutz:** Schutz gegen elektrischen Schlag unter den Bedingungen eines Einzelfehlers [IEV 195-06-02]
ANMERKUNG: Fehlerschutz entspricht für Anlagen, Systeme und Betriebsmittel der Niederspannung im Allgemeinen dem Schutz bei indirektem Berühren, wie er in IEC 60364-4-41 angewendet wird, hauptsächlich bei fehlerhafter Basisisolierung.
- **Isolierung:** Gesamtheit der Eigenschaften, die die Funktionsfähigkeit einer Isolierung beschreiben [IEV 151-15-42]
ANMERKUNG: Isolierung kann ein Feststoff, eine Flüssigkeit oder ein Gas (z. B. Luft) sein oder jede Kombination von diesen.
- **Basisisolierung:** Isolierung von gefährlichen aktiven Teilen als Basisschutz [IEV 195-06-06]
ANMERKUNG: Der Begriff „Basisisolierung“ gilt nicht für eine Isolierung, die ausschließlich Funktionszwecken dient.

- **zusätzliche Isolierung:** Unabhängige Isolierung, die zusätzlich zur Basisisolierung als Fehlerschutz angewendet wird [IEV 195-06-07]
 - **doppelte Isolierung:** Isolierung, die aus der Basisisolierung und der zusätzlichen Isolierung besteht [IEV 195-06-08]
 - **verstärkte Isolierung:** Isolierung von gefährlichen aktiven Teilen, die im gleichen Maße Schutz gegen elektrischen Schlag bietet wie die doppelte Isolierung
- ANMERKUNG: Die verstärkte Isolierung kann aus mehreren Schichten bestehen, die nicht einzeln als Basisisolierung oder zusätzliche Isolierung geprüft werden können.*

5.5.5 Zusätzlicher Schutz nach DIN EN 61140 (VDE 0140-1) sowie DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410)

Falls die vorgesehene Verwendung ein erhöhtes Risiko beinhaltet, z. B. für Bereiche mit niederohmiger Verbindung von Personen mit dem Potential der Erde, müssen Technische Komitees die Notwendigkeit in Betracht ziehen, einen zusätzlichen Schutz festzulegen. Solch ein zusätzlicher Schutz darf in der Anlage, im System oder im Betriebsmittel vorgesehen werden.

In besonderen Fällen sind abhängig von der Beurteilung durch Technische Komitees die Folgen von Doppel- oder sogar Mehrfachfehlern in Betracht zu ziehen.

Die Risikominimierung bei der Elektroinstallation nach den Normen der Reihe DIN VDE 0100 (VDE 0100) ist in Abbildung 4 dargestellt.

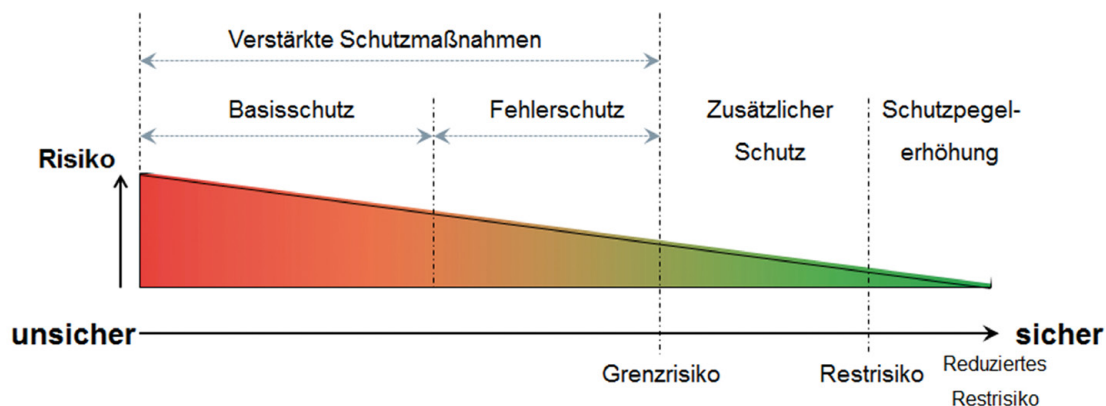


Abbildung 4 – Risikominimierung bei der Elektroinstallation nach DIN VDE 0100 (VDE 0100) [20]

Basisschutz (Schutz gegen direktes Berühren) (siehe Kapitel 6.1 Basisschutz)

- Basisisolierung aktiver Teile
- Abdeckungen oder Umhüllungen
- Hindernisse
- Anordnung außerhalb des Handbereichs

Fehlerschutz (Schutz bei indirektem Berühren) (siehe Kapitel 6.2 Fehlerschutz)

- Schutzerdung (Erdung über den Schutzleiter)
- Schutzpotentialausgleich über die Haupterdungsschiene
- Schutz durch automatische Abschaltung

Verstärkte Schutzmaßnahmen (statt Basis- und Fehlerschutz)

- doppelte oder verstärkte Isolierung
- Schutztrennung
- Schutzkleinspannung mittels SELV (en: Safety Extra Low Voltage) oder PELV (en: Protective Extra Low Voltage)

Weitere Risikominimierung durch

- zusätzlichen Schutz
 - Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs; en: Residual Current protective Device)
 - zusätzlicher Schutzpotentialausgleich
- Schutzpegelerhöhung
 - PRCD (en: Portable Residual Current Device), IC-CPD (en: In Cable Control and Protective Device)
 - Fehlerlichtbogenschutzeinrichtung AFDD (en: Arc Fault Detection Device)
- vorbeugende Maßnahmen
 - Differenzstrom-Überwachungsgeräte (RCM, en: Residual Current Monitor)
 - Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche (IFLS) in IT-Systemen

5.5.6 Funktionale Sicherheit der Elektroinstallation

Um eine gleichwertige Sicherheit bei Gleichstrominstallationen darzustellen, wird nachfolgend der Sicherheitslevel der Wechselstrominstallation betrachtet.

In der DIN EN 50495 (VDE 0170-18):2010-10 „Sicherheitseinrichtungen für den sicheren Betrieb von Geräten im Hinblick auf Explosionsgefahren“ wird hierzu der Sicherheits-Integritätslevel (SIL) wie folgt festgelegt [22]:

„Um einen erforderlichen Sicherheits-Integritätslevel zu erreichen, ist der Gesamt-Sicherheitslebenszyklus der Einrichtung zu berücksichtigen (EN 61508-1). Die erforderlichen PFD (Probability of a Failure on Demand) oder PFH (Probability of a dangerous Failure per Hour) sind in Tabelle 6 angegeben.“

SICHERHEITS- INTEGRITÄTSLEVEL	BETRIEBSART MIT NIEDRI- GER ANFORDERUNGSRATE PFD (MITTLERE WAHRSCHEIN- LICHKEIT, DASS EIN GE- FAHRBRINGENDER AUSFALL AUF ANFORDERUNG SEINE BEMESSUNGSFUNKTION AUSFÜHRT)	BETRIEBSART MIT HOHER ANFORDERUNGSRATE ODER KONTINUIERLICHER ANFORDERUNG PFH (WAHRSCHEINLICHKEIT EINES GEFAHRBRINGENDEN AUSFALLS JE STUNDE)
SIL 4	$\geq 10^{-5}$ bis $< 10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ bis $< 10^{-8}$
SIL 3	$\geq 10^{-4}$ bis $< 10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ bis $< 10^{-7}$
SIL 2	$\geq 10^{-3}$ bis $< 10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ bis $< 10^{-6}$
SIL 1	$\geq 10^{-2}$ bis $< 10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ bis $< 10^{-5}$

Tabelle 6 – Sicherheits-Integritätslevel: Ausfallgrenzwerte für eine Sicherheitsfunktion

Aus Sicht funktionaler Sicherheit ist die heutige AC-Elektroinstallation, welche nach den Normen der Reihe DIN VDE 0100 (VDE 0100) installiert und geprüft wurde vergleichbar mit SIL 3 unter Berücksichtigung der Tatsache, dass bei einem Elektrounfall ein bzw. einige wenige Menschen ums Leben kommen können (abgeleitet von DIN EN ISO 13849-1, Annex A).

Dieser theoretisch abgeleitete Wert ist nachgewiesen durch entsprechende Statistiken zu Elektrounfällen in der Bundesrepublik Deutschland. Der davon abgeleitete praktische Wert des Gesamtsystems Elektroinstallation geht aufgrund der heutigen Unfallzahlen eher in Richtung SIL 4.

5.5.7 Abschätzung der funktionalen Sicherheit auf Basis der DIN EN 50495 (VDE 0170-18) für Schutzschaltgeräte bzw. in Betriebsmittel integrierte Schutzfunktion

Die Risikoabschätzung wurde im Punkt 4.1 der Norm der DIN EN 50495 (VDE 0170-18) für Schutzschaltgeräte bzw. in Betriebsmittel integrierte Schutzfunktion behandelt [22].

„Deshalb muss das Betriebsmittel entweder sicher bei zwei unabhängig voneinander im Betriebsmittel auftretenden Fehlern sein. Wenn eine Zündschutzart nur bei einem Fehler sicher ist, kann die Fehlertoleranz des Betriebsmittels durch die Überwachung mit einer geeigneten Sicherheitseinrichtung verbessert werden; oder [...]“

Dies bedeutet für die Elektroinstallation: Erst bei zwei voneinander unabhängigen in der Installation auftretenden Fehlern, z. B. Verlust der Isolation und Versagen der Schutzeinrichtung, besteht Gefahr.

Bei heutigen Schutzschaltgeräten ist die Hardware-Fehler-Toleranz (HFT) gleich 0, d. h. beim ersten Fehler im Gerät ist der Verlust der Sicherheitsfunktion möglich (siehe Tabelle 1 der DIN EN 50495 (VDE 0170-18):2010-10). Dies ist aber kein Problem, da ein Schutzschaltgerät als Schutzmaßnahme alleine nicht zulässig ist. Es ist immer ein Basisschutz notwendig (z. B. Isolation).

In der Elektroinstallation und den genutzten Schutzschaltgeräten müssen systematische Fehler hinreichend minimiert sein.

Bei den Schutzschaltgeräten für Wechselstrom kann dies „proven in use“ sein, dies bedeutet die Nutzung bewährter elektromechanischer Schutzschaltgeräte oder systematisch entwickelter elektronischer Schutzschaltgeräte mit ausreichender interner Diagnosefähigkeit.

Abgeleitet aus Tabelle 2 der DIN EN 61508-2 (VDE 0803-2):2011-02 für mechanische Schutzschaltgeräte, bzw. Tabelle 3 für elektronische Schutzschaltgeräte ergibt sich immer SIL 1 für elektromechanische Schutzschaltgeräte inkl. Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs) vom Typ B (wg. der Sensorikredundanz). Fehlerausschluss ist bei einer extrem geringen Ausfallrate erlaubt. Diese ist durch die Lebensdauerversuche und die Rückwarenstatistik der Hersteller nachgewiesen.

Nachdem der Basisschutz für die Elektroinstallation zwingend ist, muss das Schutzschaltgerät das noch vorhandene Restrisiko abdecken. Dafür muss das Schutzschaltgerät eine bestimmte reproduzierbare Qualität haben.

Derartige Forderungen müssen auch für Gleichstrom-Schutzschaltgeräte erhoben werden. D. h. die Produktkomitees sollten sich mit dem Thema SIL auseinandersetzen und entsprechende normative Anforderungen an das Produkt stellen.

Sinngemäß ist vorzugehen, falls Schutzfunktionen in Betriebsmittel integriert werden. Für die Betrachtung von DC-IT-Systemen (ungeerdete Stromversorgung) unter dem Aspekt der funktionalen Sicherheit von Isolationsüberwachungsgeräten in IT-Systemen und von Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche in IT-Systemen ist DIN EN 61557-15 (VDE 0413-15) verfügbar.

5.6 Störlichtbögen

5.6.1 Allgemeines

Störlichtbögen verursachen Jahr für Jahr erhebliche Personen- und Anlagenschäden sowie daraus resultierende Produktionsausfallkosten. Auch modernste Schaltanlagensysteme können das Risiko einer Störlichtbogenzündung nicht vollständig ausschließen. Ursachen hierfür sind meist Fehler beim Arbeiten an der Schaltanlage, Verschmutzung, Fremdkörper oder in die Schaltanlage eindringende Tiere. Innerhalb von Millisekunden werden große Energiemengen freigesetzt, die große Hitze, eine Druckwelle und toxische Gase verursachen, sodass der Vergleich mit einer Explosion naheliegt. Für die Lichtbogenerkennung gibt es zahlreiche Möglichkeiten, z. B.:

- Erfassung des mit dem Störlichtbogen einhergehenden Überstroms,

- Erfassung des durch den Störlichtbogen emittierten Lichts,
- Frequenzanalysen.

Die erfassten Daten werden ausgewertet und initiieren wiederum unterschiedliche Möglichkeiten zur Löschung des Störlichtbogens, z. B.:

- Kurzschließen der Anlage, d. h. der Strom kommutiert vom Störlichtbogen auf den niederohmigen Kurzschluss der Kurzschließer, die Spannung bricht zusammen und als direkte Folge erlischt der Störlichtbogen,
- direkte Ansteuerung des Leistungsschalters über den Arbeitsstromauslöser.

5.6.2 Störlichtbogenschutzsysteme in Energie-Schaltgerätekombinationen (PSC-Schaltgerätekombinationen)

Niederspannungsschaltgerätekombinationen, allgemein auch Schaltanlagen genannt, werden heute in vielfältiger Weise zum Schalten, Schützen und Steuern von elektrischer Energie eingesetzt. Dabei gibt die Normenreihe DIN EN 61439 Regeln und Anforderungen für die kennzeichnenden Merkmale von Schnittstellen, Betriebsbedingungen, Konstruktion, Verhalten und Nachweise vor.

Trotz größter Sorgfalt kann das Auftreten eines Störlichtbogens innerhalb einer Schaltanlage jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Um Auswirkungen zu minimieren, gibt es für Energieschaltgerätekombinationen ergänzend zur DIN EN 61439-2 „Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen – Teil 2: Energie-Schaltgerätekombinationen“ einen „Leitfaden“ für die Prüfung und Installation von Störlichtbogenschutzsystemen. Zusätzlich werden zurzeit in den Gremien der DKE K431 „Niederspannungsschaltgeräte und -kombinationen“ und UK 431.1 „Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen“ Normen für sogenannte Störlichtbogenerkennungssysteme, Lichtbogenlöschgeräte und Anforderungen zur Integration dieser Geräte in Schaltanlagen entwickelt.

Alle hier genannten Normen berücksichtigen sowohl AC- als auch DC-Systeme, jedoch überwiegen aktuell die Praxislösungen für den AC-Betrieb am Markt. Zum Schutz von Personen vor den thermischen Gefährdungen durch Störlichtbögen gibt es aktuell von der Berufsgenossenschaft BG ETEM eine Informationsschrift DGUV-I 203-077, die im Wesentlichen den Stand der wissenschaftlichen Untersuchungen zu Störlichtbögen im AC-Bereich beschreibt. Untersuchungen zu DC-Störlichtbögen werden derzeit durchgeführt. Die Ergebnisse werden bei der laufenden Überarbeitung in die Informationsschrift DGUV-I 203-077 einfließen.

5.6.3. Personengefährdung durch Störlichtbögen und Schutz gegen die thermischen Wirkungen

In Analogie zum AC-Bereich ergibt sich eine besondere Gefährdung von Personen durch die thermische Wirkung von energiereichen DC-Störlichtbögen (Ströme im kA-Bereich). Ein Schutz von Personen ist besonders beim Arbeiten an Anlagen erforderlich, wenn eine direkte Exposition der betreffenden Person möglich ist. Bei Ausbildung stabiler Störlichtbögen besteht das Risiko von starken Hautverbrennungen und Augenschädigungen. Neben technischen und organisatorischen Maßnahmen sind deshalb Persönliche Schutzausrüstungen gegen die thermischen Gefahren eines Störlichtbogens (PSAgS) notwendig.

DC-Anlagen werden zurzeit nicht explizit in Standards oder Richtlinien zum Personenschutz behandelt. Die Normen, die zur Prüfung (DIN EN 61482-1-1 [59] und DIN EN 61482-1-2 [60]) und zu den Anforderungen an Schutztextilien und Schutzkleidung (DIN EN 61482-2 [61]) existieren, differenzieren hinsichtlich der Anwendungsbereiche nicht in AC und DC, sind aber mit Blick auf AC-Systeme entwickelt worden. Die standardisierten PSA-Prüfungen basieren auf AC-Prüfkreisen.

Die direkten thermischen Auswirkungen von DC-Störlichtbögen unterscheiden sich nicht grundsätzlich von den Verhältnissen im AC-Bereich. Die Erwärmungskurven und Wärmeflussdichten an exponierten Oberflächen (Einwirkenergien) zeigen vergleichbare Charakteristika.

In umfangreichen Untersuchungen [62] [63], die an der Technischen Universität Ilmenau mit Unterstützung durch die Berufsgenossenschaft ETEM durchgeführt werden, sind systematische Messungen an energiereichen DC-Störlichtbögen mit den Zielsetzungen vorgenommen worden, Kennwerte von DC-Störlichtbögen zu ermitteln, Schlussfolgerungen für die Prüfung und Auswahl von PSAGS abzuleiten und Ergebnisse in die Normungsarbeit einfließen zu lassen. In den Messungen werden Störlichtbögen in Systemen untersucht, die durch Gleichstromgeneratoren oder durch Stromrichter gespeist werden. Aus früheren Untersuchungen existieren auch Erkenntnisse zu Störlichtbögen in Batteriestromkreisen („Hochvoltbatterien“) [64].

In DC-Anlagen können sich im Unterschied zu AC-Anlagen bereits im Niederspannungsbereich länger andauernde, stabile Lichtbögen ausbilden. Die im DC-Lichtbogen umgesetzte Leistung wird in Analogie zum AC-Störlichtbogen hauptsächlich durch Leerlaufspannung, prospektivem Kurzschlussstrom und Elektrodenabstand bestimmt. Für die frei werdende Lichtbogenenergie WLB ist zusätzlich die Lichtbogendauer (Kurzschlussdauer) von Bedeutung (linearer Einfluss). Die für die thermischen Wirkungen des Störlichtbogens maßgebliche Einwirkenergie E_{i0} (Energiedichte an der exponierten Oberfläche) ist abhängig von der Lichtbogenenergie und dem Wirkabstand.

Erste vergleichende Untersuchungen, die statistisch bisher noch nicht gesichert sind, zeigen, dass die Energiepegel von DC-Störlichtbögen unter Standardbedingungen des Box-Tests nach DIN EN 61482-1-2 [60] mit den Prüfenergiepegeln des AC-Prüflichtbogens vergleichbar sind oder durch diese mit abgedeckt werden:

LB-SCHUTZ-KLASSE APC	I_p [kA]	AC-PRÜFKREIS			DC-PRÜFKREIS		
		W_{arc} [kJ]	E_{i0} [kJ/m ²]	E_{i0}/W_{arc} [1/m ²]	W_{arc} [kJ]	E_{i0} [kJ/m ²]	E_{i0}/W_{arc} [1/m ²]
1	4	168	146	0,87	175	146	0,83
2	7	320	427	1,33	264	360	1,36

Tabelle 7 – Vergleich der Energiepegel für Standardprüfbedingungen nach [60] im AC- und DC-Prüfkreis

Bei konischen Elektroden treten im Vergleich zu Elektroden mit planen Enden in der Regel höhere Einwirkenergiedichten auf. Diese Einwirkenergiedichte kann unter speziellen Bedingungen auch höher sein als bei AC-Störlichtbögen.

Die Untersuchungen werden weiter fortgesetzt. Deren Schwerpunkt wird auf die Weiterentwicklung des Personenschutzes bei Störlichtbögen gerichtet. Die Ergebnisse werden in die gegenwärtig laufende Überarbeitung der DGUV-I 203-077 [65] einfließen.

5.6.4 Fehlerlichtbögen in Niederspannungsanlagen

Für Wechselspannungs-Netze sind Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtungen (AFDD) normativ definiert und als Produkte erhältlich. Die Funktionsweise und der Einsatz in Wechselspannungs-Versorgungsnetzen sind in DIN EN 62606 (VDE 0665-10) bzw. DIN VDE 0100-420 (VDE 0100-420) spezifiziert.

Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen RCDs für DC sind im Entwurf der DIN IEC/TS 63053 (VDE V 0640-053) beschrieben.

Ein Produktstandard für DC-Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtungen (AFDD) für PV-Anlagen ist in Vorbereitung [66].

Nachdem derartige Schutzschaltgeräte elektronisch ausgeführt werden, muss für diese ein geeigneter SIL-Level ermittelt werden, wobei die Trennfunktion elektromechanisch ausgeführt werden muss. Dabei darf der Sicherheitslevel für LVDC-Installationen nicht geringer als der bei den heutigen Wechselstrominstallationen sein.

Zusätzlich ist zu beachten, dass die thermischen Auswirkungen des Stromes für LVDC eine höhere Gefahr als bei AC darstellen. Bei einem Wechselstrom werden gefährliche Lichtbögen durch den Stromnulldurchgang ggf. noch selbständig gelöscht. Die Gefahr durch Lichtbögen ist bei Gleichstrom erheblich höher. Wie Studien der Hochschule Regensburg gezeigt haben, ist das spannungs- und stromabhängig.

Dazu wurden Messungen an verschiedenen Gleichspannungen und -strömen durchgeführt, als Leitung wurde die in Deutschland übliche NYM-J 3x1,5 verwendet.

	48 V	120 V	230 V	326 V
1 A	(X)		X	X
1.3 A			X	
1.5 A			X	
2 A			X	
3 A			X	
5 A	X	X	X	X
7.5 A			X	
10 A			X	
16 A	X		X	X

Tabelle 8 – Auswahl der Messreihen zur Ermittlung des Lichtbogenverhaltens bei AC und DC

Folgende Aussage wurde nach Auswertung der Messreihen mit jeweils 50 Einzelmessungen je Messreihe zusammenfassend gemacht:

„Die vorliegenden Messungen haben die vermutete höhere Brandgefahr durch Gleichstromlichtbögen voll bestätigt. [...] Die getesteten Proben haben sich selbst bei kleinen Strömen wie 1,3 A noch fast zu 100 % entzündet. Zum Vergleich: der Flammenaustritt bei AC 1,3 A liegt bei nur etwa 60 %. Der Unterschied zwischen den Zündzeiten ist noch weitaus größer.

Daher muss man das Gefahrenpotential durch Brandentstehung von Gleichstrom in der Installationstechnik weitaus höher einschätzen als das von Wechselstrom!“ [21]

5.6.5 Lichtbögen in Elektroinstallationen

Im Vergleich zu konventionellen AC-Netzen stellen diese Netze andere Anforderungen an Steckverbinder, Schalter und Leitungen. Durch das Fehlen des Nulldurchgangs, wie er in einem AC-Netz auftritt, entsteht beim Schalten, Trennen oder bei Isolationsfehlern ein Lichtbogen, welcher das Material erheblich beansprucht, schädigt und letztendlich die Funktionalität beeinträchtigt. Der physikalische Effekt des Lichtbogens stellt eine ganz erhebliche Gefahr für fortschreitende Isolationsschäden und Brände dar.

Das Schalten von Gleichströmen ist optional mechanisch, elektronisch oder hybrid möglich. Neuere Entwicklungen, wie hybride elektromechanische Schaltorgane stellen einen vielversprechenden Ansatz zur Lösung der Lichtbogenproblematik dar. In Abhängigkeit der gewählten Netzform (IT oder TNS) muss sichergestellt werden, dass alle stromführenden Leiter geschaltet werden. Dies erfordert z. B. für das IT-Netz ein allpoliges Schalten.

Ein wesentliches Element für eine weitere Verbreitung von DC-Netzen in privaten, öffentlichen und halböffentlichen Gebäuden ist die Verfügbarkeit von lösbaren Verbindungen, welche ggf. auch unter Last gezogen werden. Somit ergeben sich als grundlegende Anforderungen ein Verpolschutz des Steckers sowie eine Verhinderung von Gefährdungen für Personen und Sachen beim Ziehen unter Last.

Von Steckvorgängen darf keine Gefährdung ausgehen. Dabei ist insbesondere die Möglichkeit einer Lichtbogenbildung zu berücksichtigen.



5.7 Prüfung und Betrieb

Die Anforderungen an die Erstprüfung und die wiederkehrende Prüfung elektrischer Anlagen sind in DIN VDE 0100-600 (VDE 0100-600) bzw. DIN VDE 0105-100 (VDE 0105-100) enthalten.

DIN VDE 0100-600 (VDE 0100-600) enthält die Anforderungen an die Erstprüfung elektrischer Anlagen durch Besichtigen, Erproben und Messen. Die Erstprüfung wird nach Fertigstellung einer neuen Anlage oder bei Erweiterungen oder Änderungen bestehender Anlagen durchgeführt.

DIN VDE 0105-100 (VDE 0105-100) enthält die Anforderungen für die wiederkehrende Prüfung elektrischer Anlagen, mit denen festgestellt werden soll, ob sich die Anlage und alle dazugehörigen elektrischen Betriebsmittel in einem ordnungsgemäßen Zustand für den Anlagenbetrieb befinden.

5.8 Trennen und Schalten

5.8.1 Allgemein

Um Gefahren im Zusammenhang mit elektrischen Anlagen oder elektrisch versorgten Betriebsmitteln und Maschinen zu verhindern oder zu beseitigen, muss sicheres Trennen und sicheres Schalten möglich sein (DIN VDE 0100-460 (VDE 0100-460)). Jede Einrichtung, die zum Trennen oder Schalten vorgesehen ist, muss den entsprechenden Anforderungen von HD 60364-5-53:2015 entsprechen. Jede elektrische Anlage muss Vorrichtungen aufweisen, die eine Trennung der aktiven Leiter von der Stromversorgung ermöglichen. Im Allgemeinen müssen alle elektrischen Betriebsmittel, für die ein betriebsmäßiges Schalten gefordert wird, durch einen geeigneten Schalter geschaltet werden. Für jeden Teil eines Stromkreises, der unabhängig von anderen Anlagenteilen betriebsmäßig geschaltet werden soll, ist ein Schalter vorzusehen (DIN VDE 0100-460:2018-06, Abschnitt 463.1.1). Geräte zum Ausschalten für die mechanische Instandhaltung, oder Steuerschalter für solche Geräte, müssen für Handbetätigung vorgesehen werden (DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530):2018-06, Abschnitt 537.3.2.3).

Die nach DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530) für entsprechende Anwendungen aufgeführten Produkte wurden mittlerweile weitestgehend für DC-Anforderungen überarbeitet.

Schaltgeräte für DC werden in der Normenreihe DIN EN 60947 (VDE 0660) sowie in DIN VDE 0641-14 und in dem Entwurf der DIN IEC 60898-3 (VDE 0641-13) beschrieben.

5.8.2 Halbleiterbauelemente

Halbleiterbauelemente dürfen nicht als Trenngeräte eingesetzt werden (DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530):2018-06; 537.2.2).

Schaltgeräte zum betriebsmäßigen Schalten dürfen den Strom unterbrechen ohne notwendigerweise entsprechende Trennstreckenpole zu öffnen (DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530):2018-06; 537.3.1.3). Halbleiter-Schaltelemente sind ein Beispiel für Geräte, die einen Stromkreis unterbrechen können, ohne entsprechende Trennstreckenpole zu öffnen. Solche Halbleiter-Schaltelemente haben lediglich eine Schaltfunktion, jedoch keine Trennfunktion.

5.8.3 Steckverbinder und Steckvorrichtungen

Steckverbinder dürfen im Allgemeinen nicht für das betriebsmäßige Schalten verwendet werden (E DIN VDE 0100-537 (2015-11, Anhang A). Steckverbinder werden beispielsweise nach EN 61984 ausgeführt und geprüft. Für das Trennen dürfen nur Steckverbinder mit Ausschaltvermögen (CBC; en: connector with breaking capacity, nach EN 61984) verwendet werden. Diese werden auch als Steckvorrichtungen bezeichnet. Diese sind für das Zusammenstecken und zum Ausstecken unter Spannung und Last konstruiert und dafür entsprechend geprüft. Für die Prüfung bei Gleichstromanwendungen sind jedoch noch geeignete Prüfparameter vorzugeben, die Angaben in DIN EN 61984 reichen dafür nicht aus (siehe auch Abschnitt 5.8.4). Bei Steckverbindern ohne Lastschaltvermögen (COC, en: connector without breaking capacity) müssen bei Montage in zugänglichen Bereichen entsprechende Maßnahmen gegen zufälliges und/oder unbefugtes Öffnen vorgesehen werden ((DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530):2018-06; 537.2.5).

Grundsätzlich ist aufgrund der Problematik der Lichtbogenlöschung (siehe Kapitel 5.6) in DC-Systemen stromlos und spannungsfrei zu stecken bzw. zu trennen. Ausnahmen können gesondert festgelegt werden.

Hierzu sind entsprechende Normen zu erarbeiten.



Beispielsweise wird derzeit für die DIN EN 61535 (VDE 0606-200), Installationssteckverbinder für die dauernde Verbindung in festen Installationen, an einer zweiten Edition gearbeitet, welche auch die Anwendung in DC-Netzen beschreiben wird. Hierbei wird das strom- und spannungsfreie Stecken und Trennen sowie die Verriegelung (nur lösbar mit Werkzeug) für sämtliche Steckverbindungen gefordert, um eine Fehlbedienung auszuschließen. Außerdem wird eine zusätzliche Kennzeichnung der Steckverbindung auf DC-Anwendung empfohlen. Durch diese Normüberarbeitung soll die im Anhang A dieser DC-Roadmap identifizierte Lücke bei Installationssteckverbindern geschlossen werden.

In Stromversorgungssystemen mit nur einer Energiequelle können in Abhängigkeit vom Aufbau des Systems Steckverbinder verwendet werden, deren weibliche Steckkontakte gegen Berühren geschützt sind und deren männliche Steckkontakte nicht gegen Berühren geschützt sind – wenn sich die Steckverbindung im geöffneten Zustand befindet. Zwingende Voraussetzung dafür ist, dass die gegen Berührung geschützten Steckkontakte mit der Energiequelle verbunden sind und dass auf Seiten der männlichen Steckkontakte, bei Berührung dieser Kontakte, eine Personengefährdung sicher ausgeschlossen werden kann.

In DC-Stromversorgungssystemen wird häufig mehr als eine Energiequelle eingesetzt. Bei Steckverbindern, die im Leitungsweg zwischen Stromquellen angeordnet sind, ist im Normalbetrieb bzw. im Fehlerfall ein Energiefluss in beide Richtungen möglich. Um einen wirkungsvollen Schutz gegen den elektrischen Schlag sicherzustellen, müssen bei solchen Steckverbindern – im geöffneten Zustand – sowohl die weiblichen Steckkontakte als auch männlichen Steckkontakte gegen Berühren geschützt sein.

5.8.4 Verpolungsschutz

Ein Verpolungsschutz kann durch mehrere Varianten sichergestellt werden. Es sind aktive und passive Systeme zu unterscheiden:

- Mechanisch eindeutige Steckverbindung, die eine Verpolung ausschließt. Hierzu wird ein derart geformter Stecker verwendet, der eine stets gleiche Zuordnung der Steckstifte aufgrund der mechanischen Ausführung sicherstellt. Ein Beispiel ist ein CEE-Stecker für 24 Volt/16 A mit zwei Kontakten, wie im nachfolgenden Bild dargestellt. (Bildquelle: https://de.wikipedia.org/wiki/IEC_60309)

Zur Anwendung des Steckers muss seitens des Elektroinstallateurs sichergestellt werden, dass eine richtige Polung der Kontakte sichergestellt ist. Die verpolungssichere Ausführung der Steckverbindung kann durch eine geräteseitige Ergänzung einer Verpolungssperre (bsp. Diode, aktives Halbleiterbauelement) ergänzt werden und somit eine höhere Verpolungssicherheit gewährleisten.

- Einsatz einer passiven, elektronischen Verpolungsschutteinrichtung. Diese kann im einfachsten Falle durch eine Diode realisiert werden und mit einer Anzeige eines Verpolungsfehlers kombiniert werden. Eine Verpolungsschutteinrichtung ist eine einfache und zuverlässige Methode zur Vermeidung von Verpolungen.

- Als Erweiterung der passiven, elektronischen Verpolungsschutzeinrichtung kann eine aktive Verpolungskorrektur gesehen werden. Diese stellt bei falscher Polung des Betriebsmittels eine richtige Polung innerhalb des Betriebsmittels durch die Verwendung eines aktiven, elektronischen Umschalters (Halbleiterschalt Elemente) her. Dies stellt den größten Nutzerkomfort dar. Zusätzlich werden durch die Verwendung aktiver Schaltelemente Zusatzfunktionen bereitgestellt, wie beispielsweise verzögertes Einschalten.
- Ausführungen mit Pilotkontakt. Hierbei wird ein Pilotkontakt, der vor den eigentlichen Polkontakten mit den Steckkontakten in Verbindung kommt, genutzt, um Informationen zu übertragen. Dabei kann auch die jeweilige Polarität geprüft werden und bei einer Verpolung die Kontaktierung der Stecker und Steckdosenkontakte verhindert werden.
- Einsatz einer drahtlosen Kommunikationsstrecke zwischen Stecker und Steckdose („NFC für Stecker“). Mittels der Kommunikationsstrecke können Daten zum Bedarf des Verbrauchers und zur Steckdose übertragen werden. Zudem kann die Kommunikationsstrecke genutzt werden, um Daten zur Polarisationslage zu übertragen. Hierbei kann auch eine Handlungsempfehlung beim Einstecken des Steckers gegeben werden.

Neben dem Polaritätsschutz ist eine Überwachung des Stromes bei eingeschaltetem Betriebsmittel zu beachten. Je nach Lastverhalten des Betriebsmittels kann ein kapazitives Verhalten (hoher Strom beim Einstecken) oder ein induktives Verhalten (hoher Strom beim Lösen der Steckverbindung) auftreten. Durch die Verwendung einer elektronischen Eingangsschaltung können diese Problematiken beseitigt werden.

Bei polungsunabhängigem Betrieb des Verbrauchers, ohne dass ein Verpolungsschutz technisch realisiert wird, muss eine elektrische Einrichtung vorgesehen werden, die eine Polrichtigkeit der Spannung sicherstellt. Dies kann z. B. durch einen Gleichrichter erfolgen, der im Gerät eingebaut wird. Dieser kann zudem Zusatzfunktionen übernehmen, wenn aktive Halbleiter verwendet werden, wie z. B. Umschalten des Verbrauchers in den Stand-by-Betrieb.

5.8.5 Stecker und Steckdosen

Es gibt aktuell am Markt Stecker und Steckdosen für DC-Anwendungen. Jedoch sind diese nur für eine geringe Zahl an Steckzyklen ausgelegt und eignen sich nicht für Trenn-/Schaltvorgänge unter Last ($I > 20\text{ A}$). Ziel sollte es sein, ein System mit integrierter Lichtbogenunterdrückung z. B. mittels Halbleiterschaltern zu definieren. Alternativ wären auch Systeme denkbar, die mit den dazugehörigen Geräten „kommunizieren“. Die „Kommunikation“ (nicht zwingend als Datenübertragung) könnte durch einen zusätzlichen Kontakt mit dazugehörigem Leiter realisiert werden. Eine Kommunikation hätte z. B. den Vorteil, dass der Stecker bzw. die Steckdose im nichtgesteckten Zustand spannungsfrei wäre. Dies würde den Personenschutz enorm erhöhen.

Stecker und Steckdosen bis 16 A (DIN EN 60309 (VDE 0623-1), DIN VDE 0620-1 (VDE 0620-1)) können in Wechselstromanwendungen für das Trennen und das betriebsmäßige Schalten verwendet werden (DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530):2018-06; Anhang B;).

Jedoch genügen diese Ausführungen ohne weitere Maßnahmen nicht den Anforderungen in Gleichstromanwendungen, da beim Stecken und Ziehen jeweils die Gefahr für die Ausbildung von Lichtbögen besteht (siehe auch Abschnitt 5.6).

Für DC-Stromversorgungssysteme muss in Normen festgelegt werden, ab welcher Spannung bzw. welchem Strom eine mechanische Verriegelungsvorrichtung erforderlich ist.

Die Systeme müssen in „laienbedienbar“ (verpolsicher, trennen unter Last, werkzeuglos, usw.) und „nicht-laienbedienbar“ (z. B. lastfreies Trennen, mit Werkzeug, usw.) unterschieden werden.

Prüfbedingungen für den bestimmungsgemäßen Betrieb von DC-Steckern und DC-Steckdosen könnten beispielsweise aus der nur für AC-Anwendungen gültigen DIN VDE 0620-1 abgeleitet werden:

Der Stecker wird 5 000-mal (10 000 Hübe) in die Steckdose eingeführt und wieder abgezogen, und zwar mit einer Frequenz von:

- 30 Hüben je Minute bei Steckdosen mit einem Bemessungsstrom bis einschließlich 16 A und einer Bemessungsspannung bis einschließlich 250 V;
- 15 Hüben je Minute bei anderen Steckdosen.

Jedoch müssen für die Prüfung noch weitere Parameter festgelegt werden, wie der Aufbau des Prüfkreises (induktiv bzw. kapazitiv, Charakteristik der Gleichspannungsquelle, Berücksichtigung eventueller Rückspannungen). Auch ist festzulegen, ob und wie möglicherweise vorhandene Halbleiter- und Kommunikationssysteme entweder im Steckverbinder oder an anderen Stellen der Installation (wie in der festen Installation in der Einspeisung oder in der Last oder auf beiden Seiten) zur Reduktion des Stromflusses beim Stecken und Ziehen bei der Prüfung zu berücksichtigen sind.

5.8.6 Gleichspannungs-Steckvorrichtungen in Rechenzentren und Vermittlungsstellen

Normen zu Gleichspannungs-Steckvorrichtungen für Einrichtungen der Informations- und Kommunikationstechnik in Rechenzentren und Vermittlungsstellen (P DIN IEC/TS 62735-1, VDE V 0620-600-1) werden zurzeit erstellt (s. a. IEC TS 62735-1 (2015-08) und IEC TS 62735-2 (2016-12)). Diese Technischen Spezifikationen sollte bei IEC in eine Norm überführt werden.

IEC TS 62735-1:2015 Edition 1.0 (2015-08-28) Direct current (DC) plugs and socket-outlets for information and communication technology (ICT) equipment installed in data centres and telecom central offices – Part 1: Plug and socket-outlet system for 2,6 kW

IEC TS 62735-2:2016 Edition 1.0 (2016-12-14) Direct current (DC) plugs and socket-outlets for information and communication technology (ICT) equipment installed in data centres and telecom central offices – Part 2: Plug and socket-outlet system for 5,2 kW

Hinweis: Der Anwendungsbereich von IEC TS 62735-xx, VDE V 0620-600-xx ist ausdrücklich beschränkt auf Gleichspannungs-Steckvorrichtungen in Rechenzentren und Vermittlungsstellen. Diese Normen gelten nicht für Steckvorrichtungen für den Hausgebrauch oder ähnliche Zwecke.

Für Gleichstrom werden genormte, laienbedienbare Stecker und Prüfbedingungen benötigt.



5.8.7 Vorrichtungen für den Anschluss von Leuchten

Vorrichtungen für den Anschluss von Leuchten dürfen nicht für das betriebsmäßige Schalten verwendet werden, können jedoch zum Trennen verwendet werden, wenn sie den Anforderungen von EN 61995-1 genügen (DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530):2018-06 Anhang B).

5.9 Schutz vor Restspannungen und Rückspannungen (Heckler)

Bei automatischer Abschaltung müssen die in DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410) geforderten „Maximalen Abschaltzeiten“ eingehalten werden. Innerhalb der „Maximalen Abschaltzeiten“ muss sowohl das eigentliche Schalten als auch die Verringerung von möglicherweise noch vorhandenen Spannungen auf einen ungefährlichen (Rest-) Spannungswert erfolgen. Nähere Informationen zu „Maximalen Abschaltzeiten“, bei automatischer Abschaltung im Fehlerfall, sind in DIN EN 0100-410 (VDE 0100-410):2007-06 Abschnitt 411.3.2 zu finden.

Im Regelfall sinkt in AC-Systemen die Spannung in abgeschalteten AC-Stromkreisen ohne nennenswerte Verzögerung auf einen ungefährlichen (Rest-) Spannungswert ab – sobald abgeschaltet wird.

Insbesondere in DC-Stromkreisen muss damit gerechnet werden, dass nach dem Abschalten der Versorgungsspannung, die (Rest-) Spannung im abgeschalteten DC-Stromkreis nicht sofort oder erst verzögert auf einen ungefährlichen (Rest-) Spannungswert absinkt. Zudem können insbesondere DC-Betriebsmittel Energiespeicher enthalten, die zum Entstehen von Rückspannungen führen können.

Nach automatischer Abschaltung oder betriebsmäßigem Schalten muss die Entstehung von Restspannungen und Rückspannungen möglichst verhindert oder auf ein ungefährliches Maß begrenzt werden.

Viele DC-Betriebsmittel sind mit Kondensatoren in Eingangskreisen, in Zwischenkreisen und/oder in Ausgangskreisen ausgestattet. Auch nach dem Abschalten der Versorgungsspannung oder dem Ausschalten eines Betriebsmittels muss damit gerechnet werden, dass solche Kondensatoren – oder andere Energiespeicher – noch geladen sein können oder u. U. gefährliche Spannungen erzeugen können. Abhängig vom Aufbau der Eingangs- bzw. der Ausgangsschaltung eines DC-Betriebsmittels können ggf. Restspannungen bzw. Rückspannungen in DC-Systemen auftreten. Diese Spannungen können so hoch sein, dass es zum elektrischen Schlag oder zu einer gefährlichen Körperdurchströmung kommen kann.

Um elektrische Gefahren durch gefährliche Spannungen zu verhindern, müssen die Eingangs- bzw. die Ausgangsschaltungen von DC-Betriebsmitteln so konstruiert sein, dass nach dem Abschalten der Versorgungsspannung keine berührgefährlichen Spannungen an Eingängen bzw. Ausgängen von DC-Betriebsmitteln anliegen oder entstehen können.

Eingangsschaltungen von DC-Betriebsmitteln können, zur Verhinderung von Rückspannungen, z. B. mit geeigneten Eingangsdioden versehen sein.

Besondere Vorsicht ist bei solchen DC-Systemen geboten, bei denen mehr als ein Betriebsmittel elektrische Energie einspeisen kann. In solchen DC-Systemen müssen ggf. geeignete schaltungstechnische Maßnahmen ergriffen werden, um Rückspannungen (durch speisende Betriebsmittel) wirkungsvoll zu verhindern oder zu begrenzen.

Rückspannungen können durch geeignete Einrichtungen, sowohl im Spannungswert als auch der Dauer, begrenzt werden. Beispiele hierfür sind:

- Entladevorrichtungen,
- automatische KurzschlieÙvorrichtungen,
- geeignete Schalt- und Trennvorrichtungen.

5.10 Automatisches Wiedereinschalten

Eine automatische Wiedereinschaltung von Einrichtungen zum Schutz gegen elektrischen Schlag durch automatische Abschaltung ist in Anlagen zulässig, zu denen nur elektrotechnisch unterwiesene Personen (EUP, BA4) oder Elektrofachkräfte (EFK, BA5) Zugang haben (DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530)).

Anwendungen mit SELV oder PELV dürfen generell automatisch wiedereingeschaltet werden.

5.11 Anwendung der fünf Sicherheitsregeln der Elektrotechnik

5.11.1 Allgemein

Die Beachtung der sog. „fünf Sicherheitsregeln“ ist eine wichtige Grundlage für das sichere Arbeiten an elektrischen Anlagen. Diese Regeln sind in DIN VDE 0105-100 (VDE 0105-100) zu finden. Die allermeisten Niederspannungsanlagen zur Energieverteilung sind als AC-Anlagen errichtet, und Anwender haben umfangreiche Erfahrungen in der sicheren Anwendung der fünf Sicherheitsregeln bei AC-Anlagen. In den letzten Jahren wurden zunehmend DC-Anlagen für neu entwickelte Anwendungsfelder errichtet. Deshalb wird hier auch auf die Besonderheiten hingewiesen, die für das Beachten der fünf Sicherheitsregeln bei DC-Anlagen von Bedeutung sind.

Fast unbemerkt von der breiteren Öffentlichkeit, gibt es Anwendungsfelder in denen DC seit vielen Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt wird; z. B. in den Bereichen Telekommunikation, Automatisierung, Bahntechnik und PV. Für diese Anwendungen existieren umfangreiche Praxiserfahrungen, sodass ein sicherer Betrieb möglich ist – und gleichzeitig eine hohe Verfügbarkeit erreicht wird.

In der Zukunft ist zu erwarten, dass DC vermehrt zur Energieverteilung in Privathaushalten, im öffentlichen Bereich und bei kommerziellen Anwendungen eingesetzt wird. Als Beispiele für neue Anwendungsfelder für einen sinnvollen Einsatz von DC seien hier exemplarisch Haushaltsgeräte, Beleuchtungseinrichtungen, PCs, Unterhaltungselektronik, aber auch ganze Rechenzentren genannt. Für viele der neu entstehenden DC-Anwendungsfelder liegen nur wenige Praxiserfahrungen für den sicheren Betrieb und für die Anwendung der fünf Sicherheitsregeln vor.

Bei DC-Pilotanlagen für neuartige DC-Anwendungsfelder bietet sich jedoch ein anderes Bild. Leider sind solche neuartigen DC-Anlagen manchmal so aufgebaut, dass die fünf Sicherheitsregeln u. U. nicht fehlerfrei angewandt werden können. Für den sicheren Betrieb von DC-Anlagen und für das sichere Arbeiten an DC-Anlagen ist es deshalb von großer Bedeutung, dass DC-Anlagen – und auch alle einzelnen DC-Betriebsmittel – so aufgebaut sind, dass die fünf Sicherheitsregeln fehlerfrei angewandt werden können.

Das Sicherheitsniveau von neuartigen DC-Pilotanlagen erreicht häufig noch nicht das von AC-Anlagen be-

kannte Sicherheitsniveau. Gründe hierfür sind u. a. (noch) fehlende Normen für den Betrieb von DC-Anlagen und DC-Betriebsmitteln, mangelnde Betriebsbewährung von einigen DC-Betriebsmitteln und grundlegende Unterschiede im Aufbau und im Betriebsverhalten von AC- und DC-Anlagen. Insbesondere bei Schalthandlungen, beim Löschen von Lichtbögen und beim Verhalten unter Kurzschlussbedingungen gibt es häufig zwischen AC- und DC-Anlagen erhebliche Unterschiede, die einen großen Einfluss auf den sicheren Anlagenbetrieb haben können.

Bei vielen in AC-Anlagen vorhandenen Schaltgeräten oder Überstromschutzeinrichtungen wird der Nulldurchgang der Spannung genutzt, um Betriebs- oder Kurzschlussströme wirkungsvoll zu unterbrechen. In AC-Systemen verlöschen energiearme Lichtbögen, beim Nulldurchgang der Spannung, häufig von selbst. Das ist bei DC-Anlagen leider nicht unbedingt der Fall. Bei DC-Anlagen gibt es keinen Nulldurchgang der Betriebsspannung. Das Unterbrechen von DC-Strömen, mit elektromechanischen Schaltgeräten oder Überstromschutzeinrichtungen, ist deshalb schwieriger als das Unterbrechen von AC-Strömen vergleichbarer Amplitude.

In den meisten AC-Anlagen kann mit Kurzschlussströmen gerechnet werden, die erheblich höher sind als die jeweiligen Nennströme. Hohe Kurzschlussströme ermöglichen ein sicheres Erkennen von Kurzschlüssen, und es ist vergleichsweise leicht hohe AC-Kurzschlussströme so schnell abzuschalten, dass die max. zulässigen Abschaltzeiten nicht überschritten werden. Bei vielen DC-Anlagen liegen die Kurzschlussströme nur wenig über den Nennströmen. So ist es bei niedrigen Kurzschlussströmen u. U. schwierig, Kurzschlüsse sicher zu erkennen und so rechtzeitig abzuschalten, dass die max. zulässigen Abschaltzeiten nicht überschritten werden.

5.11.2 Die fünf Sicherheitsregeln

Arbeiten an elektrischen Anlagen sind z. B. zur Wartung, zum Umbau sowie zur Beseitigung von Störungen und elektrischen Fehlern erforderlich. Im VDE-Vorschriftenwerk werden beim Arbeiten an elektrischen Anlagen folgende Arbeitsmethoden unterschieden (siehe DIN VDE 0105-100, Abschnitt 6):

- Arbeiten im spannungsfreien Zustand,
- Arbeiten unter Spannung (AuS),
- Arbeiten in der Nähe unter Spannung stehender Teile.

Die sicherste Arbeitsmethode ist das „Arbeiten im spannungsfreien Zustand“. Bei dieser Arbeitsmethode müssen die fünf Sicherheitsregeln konsequent angewandt werden (siehe DIN VDE 0105-100, Abschnitt 6.2.1):

1. Freischalten
2. Gegen Wiedereinschalten sichern
3. Spannungsfreiheit feststellen
4. Erden und kurzschließen
5. Benachbarte, unter Spannung stehende Teile abdecken oder abschränken

Alle Betriebsmittel, aus denen eine elektrische Anlage besteht, müssen so ausgewählt und angeordnet werden, dass die fünf Sicherheitsregeln fehlerfrei angewandt werden können.

Damit Arbeiten an elektrischen Anlagen sinnvoll geplant und sicher durchgeführt werden können, müssen alle an der Planung und an den Arbeiten beteiligten Personen hinreichende Kenntnis über den Aufbau, die Funktion und den Zustand der Anlage haben. Nur so können mögliche Gefahren erkannt, eingeschätzt und entsprechende Maßnahmen zur Gefahrenvermeidung und ggf. zur Gefahrenabwehr getroffen werden.

5.11.3 Freischalten (Regel 1)

Allseitig freischalten

Alle Teile einer elektrischen Anlage, an denen gearbeitet werden soll, müssen allseitig von allen Einspeisungen (Energiequellen) freigeschaltet werden. In elektrischen Anlagen mit mehreren Einspeisungen muss das Freischalten grundsätzlich für jede einzelne Einspeisung separat erfolgen.

Freischalten erfolgt immer durch Ausschalten oder Abtrennen eines oder mehrerer Stromkreise. Beim Freischalten werden Trennstellen gebildet, die in der Lage sind den zu erwartenden Spannungsunterschieden standzuhalten. Nicht alle Betriebsmittel, die einen Stromfluss unterbrechen können, sind auch zum Freischalten geeignet! Bevor freigeschaltet werden darf, müssen deshalb diejenigen Betriebsmittel identifiziert werden, die zum Freischalten geeignet sind. Alle diejenigen Betriebsmittel, die zum Freischalten geeignet sind, werden nachfolgend als Freischalteinrichtung bezeichnet.

Für das Freischalten geeignete Betriebsmittel (Freischalteinrichtung):

- Leistungsschalter (mit Trennfunktion, DIN EN 60947-2),
- Leitungsschutzschalter,
- Schmelzsicherungen,
- Lasttrennschalter (mit/ohne Sicherungen),
- RCDs,
- Steckvorrichtungen.

Bei komplexeren Anlagen sind Schaltpläne und Anlagendokumentation eine wichtige Informationsquelle (siehe DIN VDE 0100-510 (VDE 0100-510)). Sie geben Auskunft über Art und Aufbau von Stromkreisen und dienen zur Identifizierung von Betriebsmitteln mit Schutz-, Trenn- und Schaltfunktion.

In AC-Anlagen gibt es häufig nur eine einzige Einspeisung (Energiequelle). Manche AC-Anlagen verfügen jedoch über mehrere Einspeisungen. Beispiele für AC-Anlagen mit mehreren Einspeisungen:

- mehrere Trafos/Einspeisungen,
- Ersatzstromversorgungen,
- PV-Wechselrichter (mit/ohne Speicherbatterie),
- Ringleitungen.

In DC-Anlagen gibt es häufig mehr als eine Einspeisung (Energiequelle). Beispiele für DC-Anlagen mit mehreren Einspeisungen:

- mehrere Gleichrichter/Einspeisungen,
- mehrere Spannungswandler,
- Batterien,
- Ladegeräte,
- Ersatzstromversorgungen,
- PV-Wandler (mit/ohne Speicherbatterie),
- Ringleitungen.

Zur Verbindung von Stromversorgungssystemen mit unterschiedlichen Frequenzen, Spannungsniveaus und Spannungsarten werden Wandler in einer Vielzahl von Bauformen und Innenschaltungen eingesetzt. Der Energiefluss kann, je nach Bauform, sowohl in einer Richtung (→) als auch in beiden Richtungen (↔) erfolgen.

Folgende Grund-Konfigurationen sind bei Wandlern für Stromversorgungssysteme möglich:

- AC → AC
- AC ↔ AC
- AC → DC
- AC ↔ DC
- DC → AC
- DC ↔ AC
- DC → DC
- DC ↔ DC

Wandler zwischen unterschiedlichen Stromversorgungssystemen sollten stets beidseitig freigeschaltet werden.

In AC- und DC-Anlagen können Energiequellen vorhanden sein, die auf Grund ihres Aufbaus nicht abgeschaltet bzw. spannungsfrei gemacht werden können (z. B. Batterien, PV-Anlagen, USV-Anlagen). Bei solchen Anlagen oder Anlagenteilen muss deshalb vor dem Beginn von Arbeiten eine gesonderte Gefährdungsbeurteilung durchgeführt werden. Bei der Gefährdungsbeurteilung und bei den Festlegungen von Arbeitsmethoden müssen insbesondere die möglichen Auswirkungen von Lichtbögen berücksichtigt werden. Deshalb wird zum sicheren Arbeiten in solchen Anlagen oder Anlagenteilen – mit nicht abschaltbaren Energiequellen – stets eine Kombination der o. g. drei Arbeitsmethoden (siehe Kapitel 5.11.2) angewandt.

Schaltvermögen beachten

Das Schaltvermögen einer Freischalteinrichtung muss hoch genug sein, um ein gefahrloses Freischalten – bei den möglicherweise während des Freischaltens auftretenden Strömen und Spannungen – zu ermöglichen.

In DC-Anlagen gibt es, im Gegensatz zu AC-Anlagen, keinen Nulldurchgang der Spannung. Deshalb ist das DC-Schaltvermögen eines Schaltgeräts oder einer Überstromschutzeinrichtung (Leitungsschutzschalter, Sicherung, Lasttrennschalter, usw.) im Regelfall niedriger als das jeweilige AC-Schaltvermögen. Zudem kann das DC-Schaltvermögen von Schaltgeräten polaritätsabhängig sein. Das DC-Schaltvermögen muss besonders bei der Auswahl von Schaltgeräten, Überstromschutzeinrichtungen und anderen Schalteinrichtungen/ Schutzeinrichtungen für DC-Anlagen beachtet werden.

Wird eine Sicherung oder ein Sicherungstrenner als Freischalteinrichtung verwendet, so muss die mögliche Lichtbogenbildung während des Freischaltens beachtet werden. Das gilt insbesondere beim Freischalten (und Wiedereinschalten) von DC-Stromkreisen mit Hilfe von Sicherungen und Sicherungstrennern.

Rückspannungen beachten

Beim Freischalten muss auf Betriebsmittel geachtet werden, bei denen Rückspannungen auftreten können. Mit Rückspannungen muss insbesondere bei solchen Betriebsmitteln gerechnet werden, die Kondensatoren in ihren Eingangsschaltungen besitzen oder die (rekuperativ) elektrische Energie zurückspeisen können.

In AC- und in DC-Anlagen werden heutzutage häufig elektronische Betriebsmittel eingesetzt, deren Eingangsschaltungen und Zwischenkreise mit Kondensatoren ausgestattet sind. Insbesondere in DC-Anlagen, mit modernen elektronischen Betriebsmitteln, muss davon ausgegangen werden, dass es zum Auftreten von Rückspannungen kommen kann.

Freischalteinrichtung mit Trennstrecke aus Luft

Freischalten bedeutet, dass eine Trennstrecke in Luft (oder gleichwertiger Isolation) hergestellt wird (siehe DIN VDE 0105-100 (VDE 0105-510), Abschnitt 6.2.2). Die Trennstrecke muss groß genug sein, um ungewollte Überschläge verhindern zu können. Bei der Dimensionierung von Trennstrecken müssen die für das sichere Freischalten erforderlichen Luft- und Kriechstrecken eingehalten werden. Deshalb werden für das Freischalten stets elektromechanische Einrichtungen eingesetzt (z. B. Leistungsschalter, Leitungsschutzschalter, (Last-) Trennschalter, Sicherungstrenner).

Hinweise:

- Halbleiterbauelemente dürfen nicht als „Geräte zum Trennen“ eingesetzt werden, und sie dürfen deshalb nicht zum Freischalten verwendet werden (siehe DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530):2018-06; 537.2.2). Ausschließlich aus Halbleiterbauelementen aufgebaute Schaltvorrichtungen sind nicht für das Freischalten zulässig.
- Eine Hybrid-Schaltvorrichtung, bestehend aus Halbleiterbauelementen und Trennstrecken – mit ausreichenden Luft- und Kriechstrecken – kann für das Freischalten geeignet sein. Häufig sind Hybrid-Schaltvorrichtungen jedoch lediglich in der Lage Betriebsströme abzuschalten. In solch einem Fall ist mindestens eine zusätzliche externe Überstromschutzvorrichtung erforderlich, um den Schutz gegen Überströme bzw. Kurzschlussströme sicherstellen zu können.

Betätigung der Freischalteinrichtung von Hand

In Niederspannungsanlagen muss eine Freischalteinrichtung von Hand betätigt werden können. Deshalb sind Freischalteinrichtungen im Regelfall mit geeigneten Hebeln, Knebeln, Knöpfen o. Ä. ausgestattet.

Eindeutigkeit des Schaltzustands der Freischalteinrichtung

Eine Freischalteinrichtung muss so konstruiert sein, dass solche Schaltzustände, bei denen das Schaltglied zwischen offenem und geschlossenem Zustand verharren kann, sicher vermieden werden.

Jede Freischalteinrichtung muss so aufgebaut sein, dass der Schaltzustand zweifelsfrei erkennbar ist. Deshalb verfügen Freischalteinrichtungen im Regelfall über eine Betätigungsvorrichtung (Hebel, Knebel, Knöpfe o. Ä.), an deren Stellung sich der Schaltzustand erkennen lässt. Eine Betätigungsvorrichtung, und eine ggf. zusätzlich vorhandene mechanische Anzeige des Schaltzustands, müssen so konstruiert sein, dass der angezeigte Schaltzustand immer dem wirklichen Schaltzustand der entsprechenden Freischalteinrichtung entspricht. Eine Leuchtanzeige allein ist deshalb im Regelfall nicht geeignet, um einen Schaltzustand zweifelsfrei anzuzeigen. Auch eine Hybrid-Schaltvorrichtung – die als Freischalteinrichtung eingesetzt werden soll – benötigt deshalb eine Betätigungsvorrichtung bzw. eine mechanische Anzeige, um den Schaltzustand zweifelsfrei anzeigen zu können.

5.11.4 Gegen Wiedereinschalten sichern (Regel 2)

Damit eine Anlage, an der gearbeitet werden soll, während der Arbeiten dauerhaft spannungsfrei bleibt, müssen Freischalteinrichtungen gegen Wiedereinschalten gesichert werden.

Besondere Vorsicht ist bei Anlagen oder Anlagenteilen mit mehrfachen Einspeisungen geboten. Das ist z. B. bei Ringleitungen und bei Anlagen mit mehr als einer Energiequelle der Fall. Für das Sichern gegen Wiedereinschalten gilt grundsätzlich: Jede einzelne Freischalteinrichtung muss gegen Wiedereinschalten gesichert werden.

Das Sichern gegen Wiedereinschalten kann z. B. durch das mechanische Sperren einer Betätigungsvorrichtung bzw. durch die mechanische Sperrung des Betätigungsmechanismus erfolgen. Um unbeabsichtigte Schalthandlungen zu vermeiden, sind viele Freischalteinrichtungen abschließbar – sie können z. B. mit einem Vorhängeschloss gegen Betätigung gesichert werden. Ist keine mechanische Sperrung einer Betätigungseinrichtung möglich, so muss eine bewährte andere Methode gewählt werden, um gegen Wiedereinschalten zu sichern.

Freischalteinrichtungen können z. B. mit einem Energiespeicher (Federpaket o. Ä.) oder mit einer Hilfsenergieversorgung (Strom, Druckluft o. Ä.) ausgestattet sein. Im freigeschalteten Zustand darf in Energiespeichern keine Energie vorhanden sein, die ein Wiedereinschalten ermöglicht. Energiespeicher sind zu deaktivieren (z. B. Federpaket entspannen). Ebenso ist, durch geeignete Maßnahmen, die ggf. vorhandene Hilfsenergieversorgung unwirksam zu machen.

Insbesondere Freischalteinrichtungen in Mittelspannungs- und Hochspannungsanlagen werden häufig von Ferne betätigt. Betätigungsvorrichtungen vor Ort sind manchmal gar nicht vorhanden. Nach dem Freischalten muss eine Betätigung von Ferne sicher verhindert werden. Auch eine Betätigung von ferngesteuerten Freischalteinrichtungen mit Betätigungsvorrichtungen vor Ort muss nach dem Freischalten sicher verhindert werden. Alle hierfür verwendeten Übertragungssysteme bzw. Verriegelungen, müssen zuverlässig sein.

Bevor mit dem Arbeiten an einer freigeschalteten elektrischen Anlage begonnen wird, müssen geeignete Warn- und Verbotsschilder angebracht werden, die vor unerlaubten Schalthandlungen warnen (siehe DIN EN ISO 7010). Bei Freischalteinrichtungen mit kleinen räumlichen Abmessungen (z. B. Leitungsschutzschalter), können hierfür auch geeignete Abdeckungen, Aufkleber o. Ä. verwendet werden.

Wenn Sicherungseinsätze zum Freischalten verwendet werden, so müssen die Sicherungseinsätze aus dem Sicherungshalter herausgenommen werden und für die Dauer des Freischaltens sicher verwahrt werden. Sicherungen müssen durch Schraubkappen, Blindeinsätze oder durch andere geeignete Einsätze ersetzt werden. Schraubkappen, Blindeinsätze oder andere geeignete Einsätze müssen so konstruiert sein, dass sie nur mit besonderem Werkzeug (z. B. Schüssel) entfernt werden können.

Energiespeicher, die auch nach dem Freischalten Rückspannungen liefern können (z. B. Kondensatoren, Kabel) müssen entladen werden und ggf. geerdet und kurzgeschlossen werden. Zum Entladen solcher Energiespeicher dürfen nur solche Betriebsmittel eingesetzt werden, die ein sicheres Entladen ermöglichen.

5.11.5 Spannungsfreiheit feststellen (Regel 3)

Um ein sicheres Arbeiten zu ermöglichen, muss die Spannungsfreiheit an der Arbeitsstelle – oder so nahe wie möglich an der Arbeitsstelle – festgestellt werden. Der verwendete Spannungsprüfer bzw. das verwendete Messgerät muss für den jeweiligen Einsatzzweck geeignet sein. Auswahlkriterien sind z. B.:

- max. zu erwartende Spannung,
- Erforderliche Überspannungskategorie,
- max. zu erwartender Kurzschlussstrom,
- Spannungsart/Frequenz/Polarität,
- Umgebungsbedingungen.

Wichtige Hinweise:

- Für die Feststellung der Spannungsfreiheit in Niederspannungsanlagen können zweipolige Spannungsprüfer nach DIN EN 61243-3 (VDE 0682-401) eingesetzt werden.
- Wird ein Spannungsprüfer bzw. Messgerät eingesetzt, dessen Spannungseingang einen hohen Innenwiderstand hat, so kann es auch bei energiearmen kapazitiven oder induktiven Einkopplungen in Leitungen vorkommen, dass auch bei bereits freigeschalteten Leitungen kapazitive oder induktive Blindspannungen vom Messgerät gemessen und angezeigt werden.
- Einige Spannungsprüfer verfügen über eine sog. "Lastzuschaltung". Eine Lastzuschaltung kann z. B. genutzt werden um kapazitive oder induktive Blindspannungen zu unterdrücken oder um Kondensatoren zu entladen. Die zulässige Dauer der Lastzuschaltung kann vom Hersteller eines Spannungsprüfers eingeschränkt werden.
- Wird ein Multimeter eingesetzt, so darf es nur dann eingesetzt werden, wenn es für die entsprechende Spannungsmessung konfiguriert ist. Ist das Multimeter irrtümlicherweise für eine Strommessung konfiguriert, und wird es in dieser Konfiguration zur Feststellung der Spannungsfreiheit benutzt, so besteht akute Unfallgefahr! In energietechnischen Anlagen mit nennenswerten Kurzschlussströmen ist deshalb die Verwendung von Multimetern – zum Feststellen der Spannungsfreiheit – nicht zu empfehlen. Zweipolige Spannungsprüfer für Niederspannungsanlagen (nach DIN EN 61243-3 (VDE 0682-401) sind besonders gut für eine sichere Anzeige des Spannungszustands und zum Feststellen der Spannungsfreiheit geeignet.

Die Spannungsfreiheit darf nur durch Elektrofachkräfte (EFK) oder durch elektrotechnisch unterwiesene Personen (EUP) festgestellt werden. Das Nichtvorhandensein von Spannung darf nicht als vollzogene Freischaltung gewertet werden!

In Anlagen mit Kondensatoren müssen die entsprechenden Entladezeiten der Kondensatoren abgewartet werden, bevor mit der Feststellung der Spannungsfreiheit begonnen werden darf.

Spannungsprüfer und Spannungsprüfeinrichtungen müssen unmittelbar vor dem Gebrauch überprüft werden. Nach Möglichkeit sollten sie auch nach dem Gebrauch überprüft werden.

Falls die Arbeit unterbrochen wird, so muss die Spannungsfreiheit an der Arbeitsstelle – vor der Wiederaufnahme der Arbeit – erneut festgestellt werden.

In der Praxis kann es aus vielfältigen Gründen vorkommen, dass an einem Betriebsmittel immer noch Spannung anliegt, obwohl dieses Betriebsmittel vermeintlich freigeschaltet wurde. Mögliche Ursachen hierfür sind z. B.:

- fehlerhafte Beschriftung von Freischalteinrichtungen (Leistungsschalter, Leitungsschutzschalter, Sicherungen, Trenner, usw.),
- Verwechslung von Freischalteinrichtungen beim Freischalten (z. B. falscher Leitungsschutzschalter ausgewählt),
- Verwechslung der Arbeitsstelle,
- fehlerhafte Schaltpläne (Leitungsführungen, Bezeichnungen, usw.),
- Verwechslung von Leitungen,
- nicht alle Energiequellen freigeschaltet (z. B. Ersatzstromversorgung),
- Rückspannungen (z. B. durch Kondensatoren, Kabel),
- Spannungsverschleppungen durch unterbrochenen PEN-Leiter oder unbekannte Querverbindungen,
- kapazitiv oder induktiv eingekoppelte Spannungen in bereits freigeschalteten Leitungen.

Manchmal ist es schwierig freigeschaltete Kabel an der Arbeitsstelle eindeutig zu identifizieren. Wenn Verwechslungsgefahr besteht, und ein möglicherweise nicht freigeschaltetes Kabel "geschnitten" werden muss, so müssen bewährte Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden. Bei Kabeln, deren Spannungsfreiheit

nicht eindeutig festgestellt werden kann, können z. B. geeignete Kabelschneidgeräte oder geeignete Kabelbeschussgeräte verwendet werden.

5.11.6 Erden und kurzschließen (Regel 4)

Erden und kurzschließen ist in Hochspannungsanlagen immer erforderlich. In Niederspannungsanlagen kann vom Erden und Kurzschließen abgesehen werden, wenn kein Risiko besteht, dass die entsprechende Anlage ungewollt unter Spannung gesetzt werden kann.

Mögliche Ursachen für das ungewollte "unter Spannung setzen" von freigeschalteten Niederspannungsleitungen:

- elektrische/magnetische Felder von (Hochspannungs-)Freileitungen in der Nähe,
- elektrische/magnetische Felder von Niederspannungsleitungen; bei paralleler Verlegung in unmittelbarer Nähe zu freigeschalteten Niederspannungsleitungen,
- Ersatzstromversorgungsanlagen,
- dezentrale Energieversorgungsanlagen (PV-Anlagen, Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, Brennstoffzellen, usw.).

Hinweise:

- Zu unterschiedlichen Zeitpunkten können die durch elektrische/magnetische Felder eingekoppelten Spannungen unterschiedlich hoch sein.
- Die durch elektrische/magnetische Felder eingekoppelten Spannungen in freigeschalteten Kabeln und Leitungen können in ungünstigen Fällen so hoch sein, dass die dauernd zulässigen Berührungsspannungen (50 V AC, 120 V DC) überschritten werden können. Geeignete Schutzmaßnahme: Erden und kurzschließen.

Bei elektrisch nicht isolierten Niederspannungs-Freileitungen müssen alle aktiven Leiter (L1, L2, L3, N), sowie Schalt- und Steuerdrähte, in unmittelbarer Nähe zur Arbeitsstelle, geerdet und kurzgeschlossen werden.

Erdungs- und Kurzschließvorrichtungen müssen für den jeweils beabsichtigten Einsatzzweck geeignet sein. Beim Arbeiten mit Erdungs- und Kurzschließvorrichtungen muss unbedingt beachtet werden, dass die einzelnen Kontakte in der vorgegebenen Reihenfolge angeschlossen werden. Erdungs- und Kurzschließvorrichtungen werden zuerst mit der Erde verbunden und erst danach mit zu erdenden und kurzzuschließenden Teilen verbunden. Die Aufhebung dieser Maßnahme erfolgt in umgekehrter Reihenfolge.

Wird Erden und Kurzschließen bei einem Leitungszug angewandt, der durch die Arbeiten unterbrochen wird, so wird Erden und Kurzschließen auf beiden Seiten der Unterbrechungsstelle angewandt.

5.11.7 Benachbarte, unter Spannung stehende Teile abdecken und abschränken (Regel 5)

Arbeiten in der Nähe von unter Spannung stehenden Teilen sollten möglichst vermieden werden. Können unter Spannung stehende Teile, die sich in möglicherweise gefährlicher Nähe zur Arbeitsstelle (Annäherungszone, Gefahrenzone) befinden, nicht spannungsfrei gemacht werden, so sind die unter Spannung stehenden Teile abzudecken oder abzuschranken. Hierbei sind die gleichen Sicherheitsmaßnahmen anzuwenden wie bei "Arbeiten in der Nähe unter Spannung stehender Teile" (siehe DIN VDE 0105 100, Abschnitt 6.4). Isolierende

Abdeckungen müssen eine hinreichende mechanische und elektrische Festigkeit aufweisen und sie müssen zuverlässig angebracht werden, um einen wirksamen Schutz gegen zufälliges Berühren zu bieten.

Hinweis:

Diese Sicherheitsregel darf zu einem beliebigen Zeitpunkt angewandt werden. So kann es z. B. zweckmäßig sein benachbarte, unter Spannung stehende Teile abzudecken oder abzuschränken, noch bevor andere der fünf Sicherheitsregeln angewandt werden.

5.11.8 Normen und Regelwerke

- DIN VDE 0100-510 (VDE 0100-510):2014-10: Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 5-51: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel
- DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530):2018-06: Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 530: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel Schaltgeräte und Steuergeräte
- DIN VDE 0105-100 (VDE 0105-100):2015-10: Betrieb von elektrischen Anlagen – Teil 100: Allgemeine Festlegungen
- DIN EN 60947-2 (VDE 0660-101):2018-05: Niederspannungsschaltgeräte – Teil 2: Leistungsschalter
- DIN EN 61243-3 (VDE 0682-401):2015-08: Arbeiten unter Spannung – Spannungsprüfer – Teil 3: Zweipoliger Spannungsprüfer für Niederspannungsnetze
- DIN EN ISO 7010 (2012-10): Graphische Symbole – Sicherheitsfarben und Sicherheitszeichen – Teil 2: Registrierte Sicherheitszeichen
- DGUV Information 203-001 (2015-10): Sicherheit bei Arbeiten an elektrischen Anlagen
- DGUV Vorschrift 4 (2005): Unfallverhütungsvorschrift „Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“
- DGUV Information 203-050 (2005): Kommentar zur UVV „Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“

6.1 Basisschutz

Unter Basisschutz wird bei Geräten und Anlagen der Schutz im fehlerfreien Betrieb verstanden. Dazu sind geeignete Maßnahmen erforderlich, die das Berühren von stromführenden Teilen im normalen Betrieb der Geräte oder Anlagen verhindern.

Abhängig von der vorgesehenen Nutzung des Gerätes oder der Anlage (z. B. gewerblich oder im Haushalt) werden für den Basisschutz individuell passende Schutzvorkehrungen ausgewählt. Die Vorkehrungen erstrecken sich von der – bei Geräten am häufigsten verwendeten – Basisisolierung bis hin zu Maßnahmen, die ausschließlich im gewerblichen Bereich angewendet werden dürfen, weil sie Fachwissen oder Schulung bedingen, z. B. Schutz durch Hindernisse oder Anordnung außerhalb des Handbereiches.

Die Grundlagen für die Konzeption und Auswahl der Schutzmaßnahmen wurden in internationalen Normen festgelegt und auch wiederholt aktualisiert. Dies sind die Sicherheitsgrundnormen des IEC TC 64, die DIN EN 61140 (VDE 0140-1) und die DIN IEC/TS 60479-1, -2, die in Deutschland teilweise als Vornormen DIN VDE V 0140-479-X (VDE V 0140-479-X) übernommen sind.

Für die Errichtung von Niederspannungsanlagen gelten die Festlegungen der Normen der Reihe DIN VDE 0100 (VDE 0100), u. a. mit DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410).

Auf deren Grundlagen werden bei der IEC in unterschiedlichen Gremien konkrete Schutzmaßnahmen für Geräte bzw. Anlagen entwickelt. Bei der Konzeption von DC-Anwendungen müssen dabei die von AC abweichenden Schwellen für Herzkammerflimmern berücksichtigt werden.

Neben rein mechanischen Schutzvorkehrungen (wie z. B. Isolierung, Umhüllung, Gehäuse) wird das hohe Sicherheitsniveau durch Einsatz geeigneter Schutzgeräte erreicht. Auch hier werden die Grundlagen in den Gerätekomitees bei IEC umgesetzt (IEC/TC 23) und teilweise für den europäischen und nationalen Markt ergänzt, um das gewohnt hohe Sicherheitsniveau in Deutschland zu gewährleisten.

6.2 Fehlerschutz

Unter Fehlerschutz wird bei Geräten und Anlagen der Schutz beim Auftreten eines (Einzel-)Fehlers verstanden. Da die Konzeption der Schutzmaßnahmen generell von der sicheren Abschaltung des ersten Fehlers ausgeht, werden Doppel- oder Mehrfachfehler nicht betrachtet.

Ausnahme bilden hier IT-Systeme (ungeerdete Stromversorgung), bei denen der Fehlerstrom bei einem ersten Fehler so gering ist, dass eine automatische Abschaltung nicht erforderlich ist. Voraussetzung ist jedoch, dass diese IT-Systeme mit einem Isolationsüberwachungsgerät (IMD) nach DIN EN 61557-8 (VDE 0413-8) überwacht werden und der erste Fehler an entsprechender Stelle gemeldet wird. Sie werden deshalb bevorzugt in Bereichen eingesetzt, bei denen ein erster Fehler nicht zur Abschaltung führen darf.

Auch für den Fehlerschutz werden in Abhängigkeit von der Nutzung des Gerätes oder der Anlage geeignete Schutzvorkehrungen ausgewählt, die dann in Kombination mit dem Basisschutz einen umfassenden Schutz bieten.

Entsprechend der Auswahl/Konzeption der Schutzmaßnahme werden die Betriebsmittel in Schutzklassen eingeteilt (siehe auch DIN EN 61140 (VDE 0140-1)), d. h. SK I, II, III.



Abgesehen von den Grenzwerten für die Abschaltbedingungen gelten hier die gleichen Betrachtungen wie für AC. Die geforderten Abschaltzeiten sind auch für DC in der DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410) festgelegt.

Auch Normen für Schutzgeräte für DC-Anwendungen sind teilweise verfügbar, oder sind bereits bei IEC initiiert. Die E DIN IEC 60898-3 für Leitungsschutzschalter für reinen Gleichstrom wird zurzeit bei IEC/SC 23E erarbeitet. Produktnormen für RCDs für Gleichstromanwendungen werden ebenfalls vorbereitet.

Die Normen für die Anwendung von Isolationsüberwachungsgeräte für DC-IT-Systeme sind in DIN EN 61557-8 (VDE 0413-8) und für Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche in DC-IT-Systemen sind in DIN EN 61557-9 (VDE 0413-9) beschrieben.

Für DC-Systeme sind Sicherungen nach DIN EN 60269-6 (VDE 0636-6) bereits verfügbar.

6.3 Zusatzschutz (z. B. direktes Berühren) mit gleichem Niveau zu AC nur bis 200 V DC gegen Erde

Unter Zusatzschutz wird eine Schutzmaßnahme in einer Anlage verstanden, die ergänzend zum Basis- und Fehlerschutz ausgewählt wird. Hierbei handelt es sich um eine Maßnahme für den Schutz gegen elektrischen Schlag.

In Zusammenarbeit zwischen IEC/TC 64 und IEC/TC 23 „Electrical accessories“ wurden Untersuchungen vorgenommen, um festzustellen, bis zu welcher Spannungsebene bei DC-Anwendungen von einem vergleichbaren Schutzniveau ausgegangen werden kann, wie bei AC. Hierbei wurden einerseits die Schwellenwerte für Herzkammerflimmern, andererseits die Verfügbarkeit von Schutzeinrichtungen, betrachtet.

Die Analyse ergab, dass bis zu Betriebsspannungen von ca. 200 V gegen Erde bei DC-Anwendungen ein vergleichbares Schutzniveau gewährleistet werden kann, wie für AC und auch die entsprechenden Schutzeinrichtungen normativ und als Produkt existieren (siehe auch Kapitel 6.2 Fehlerschutz).

Anwendungen mit höheren Betriebsspannungen erfordern besondere Maßnahmen oder besondere Installationen (niederohmig geerdeter Mittelpunkt bei 400 V DC, oder abgeschlossene Betriebsstätten usw.) und sollten für den Laienbereich nicht angewendet werden.

6.4 Brandschutz und Sachschutz

Im Wesentlichen wirken die Maßnahmen für den Basis-, Fehler-, und Zusatzschutz respektive die Schutzeinrichtungen auch für den Brand- und Sachschutz.

Für die DC-Seite von PV-Anlagen wurden bereits entsprechende Schutzeinrichtungen entwickelt.

IEC/TC 82 und IEC/SC 23E haben hierzu Normungsaktivitäten initiiert.

6.5 Schutz gegen thermische Einflüsse

Die Wärme, die von elektrischen Betriebsmitteln erzeugt wird, darf keine Gefahr oder schädliche Auswirkungen auf benachbartes festes Material oder auf solches, welches sich vorhersehbar in der Nähe dieser Betriebsmittel befinden kann, hervorrufen. Elektrische Betriebsmittel dürfen keine Brandgefahr für benachbartes Material darstellen.

Bei Anlagen gelten auch für DC-Anwendungen die normativen Festlegungen der DIN VDE 0100-442 (VDE 0100-420).

Derzeit ist das IEC/TC 64 dabei, in der IEC 60364-5-53 (in DE DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530)) „Auswahl und Errichtung von Schutzeinrichtungen“ den bisher leeren Abschnitt 532 – „Geräte für den Schutz gegen thermische Auswirkungen“ zu erarbeiten. Hierin sind bislang die Anforderungen für DC-Anwendungen noch nicht enthalten.

Täglich werden weltweit elektrotechnische Arbeiten ausgeführt. Die Gefahr, durch technische Defekte, Fehlhandlungen, Verunreinigungen oder Fremdkörper in der Anlage Störlichtbögen auszulösen, ist dabei nicht auszuschließen. Eine Gefährdung für die ausführenden Fachkräfte besteht vor allem durch Verbrennungen, da bei der Ausbreitung des Lichtbogens Temperaturen von über 10 000°C entstehen können. Vor den thermischen Auswirkungen schützt – neben den technischen Systemen – in erster Linie eine störlichtbogengeprüfte persönliche Schutzausrüstung.

Diese besteht aus:

- Elektriker-Schutzhelm mit Schutzschirm,
- Schutzhandschuhen,
- Schutzanzug.

Arbeitgeber müssen nach dem Arbeitsschutzgesetz und der Betriebssicherheitsverordnung den Schutz vor Störlichtbögen bei der Gefährdungsbeurteilung berücksichtigen. Liegt eine mögliche Gefährdung vor, so muss der Arbeitgeber eine persönliche Schutzausrüstung bereitstellen und dafür sorgen, dass diese getragen wird. Die persönliche Schutzausrüstung muss durch eine akkreditierte Zertifizierungsstelle geprüft und zugelassen sein.

Um Schäden an Anlagen und Personen zu vermeiden bzw. zu reduzieren, können aktive und passive Störlichtbogenschutzmaßnahmen ausgeführt werden. Die aktiven Maßnahmen orientieren sich hierbei auf eine Vermeidung der Ursachen (siehe auch Kapitel 5.6.1), während die passiven bzw. reaktiven Maßnahmen von der Störlichtbogenentstehung ausgehen.

In einigen Niederspannungs-Anlagen werden daher bereits aktive Störlichtbogenschutzmaßnahmen realisiert, die im Fehlerfall innerhalb weniger Millisekunden wirksam sind. Die Anforderungen für solche Einrichtungen sind in der DIN VDE 0100-420 (VDE 0100-420) beschrieben. Das primäre Schutzziel dieser fest installierten Einrichtungen ist der Anlagenschutz sowie der Schutz von Personen bei geschlossenen Anlagen. Damit diese Schutzziele erreicht werden, ist für den Anlagenschutz der Energieumsatz des Lichtbogens auf Werte < 100 kW und für den Personenschutz auf Werte < 250 kW zu begrenzen. Die Installation dieser Systeme beschränkt sich im Allgemeinen auf Anlagen mit hohen Anforderungen bezüglich der Verfügbarkeit und dies meist in Kombination mit sehr hohen Kurzschlussleistungen. Bezogen auf die Wartungstätigkeiten, die unter Spannung ausgeführt werden, besitzt daher nur ein Bruchteil der Anlagen eine Störlichtbogenschutzvorrichtung. AuS ist jedoch weit verbreitet und wird insbesondere auch in Netzen durchgeführt, welche mit strombegrenzenden Sicherungen geschützt sind.

Bei AuS, beispielsweise am Niederspannungsverteiler, sind Personen einer direkten Exposition zum Störlichtbogen ausgesetzt. Für AuS wird daher das Tragen einer persönlichen Schutzausrüstung (PSA) vorgeschrieben. Diese Schutzbekleidung ist geeignet, die thermische Wirkung von Störlichtbögen soweit zu reduzieren, dass die Personen keine Verbrennungen 2ten Grades erleiden. Entsprechend der DIN EN 61482-1-2 (VDE 0682-306-1-2) kann dieser Schutzanspruch mit einer PSA-Klasse 1 bis zu einer Lichtbogenenergie von 158 kJ und mit der Klasse 2 bis 318 kJ sichergestellt werden. Eine Hilfe zur Bewertung der thermischen Gefährdung durch Störlichtbögen und zur Auswahl der persönlichen Schutzeinrichtung gibt die DGUV Information 203-077. Um eine drastische Reduzierung der thermischen Wirkung und insbesondere auch der weiteren Wirkungen des Lichtbogens zu erreichen, wird auf die Möglichkeit des zusätzlichen Einsatzes eines mobilen Kurzschließers während der AuS zur Optimierung des Personenschutzes hingewiesen.

6.6 Korrosionsschutz

Allgemeine Anforderungen sind in der DIN EN 50162 (VDE 0150) „Schutz gegen Korrosion durch Streuströme aus Gleichstromanlagen“ enthalten.

Streustromkorrosionen können an der Außenseite von erdverlegten Anlagen oder an der Innenseite von Anlagen auftreten, die Elektrolytlösungen enthalten, beispielsweise bei einer Wasserleitung in der Nähe von Isolierverbindungen oder an Rohrverbindungen mit hohem Widerstand.

Streuströme können auch andere Auswirkungen haben, wie z. B. Überhitzung. Gleichstrombetriebene Anlagen, die, beabsichtiger oder unbeabsichtiger Weise, Ströme verursachen können, die im Erdboden oder in einer sonstigen Elektrolytlösung fließen, umfassen:

- gleichstrombetriebene Bahnen; (ggf. gleichstrombetriebene Fahrzeuge gespeist über Oberleitung oder Stromschiene),
- Oberleitungs-Omnibus-Systeme (siehe Abbildung 5),
- Gleichstrom-Kraftanlagen,
- gleichstrombetriebene Anlagen an Industriestandorten,
- Gleichstrom-Fernmelde- und Nachrichtensysteme,
- kathodische Korrosionsschutzsysteme,
- Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssysteme (HGÜ),
- Landstromversorgung von Schiffen,
- gleichstrombetriebene Signalanlagen für Gleise.

Bei DC-Anlagen sind folgende Erdungsschemata üblich:

- negativer Pol geerdet,
- positiver Pol geerdet,
- Erdung des Mittelpunktleiters,
- isolierter Betrieb.

Bei DC-Leitern mit positiver Ladung (im Verhältnis zum Erdpotential) kann es bei Isolations-Ableitströmen oder bei Leckströmen zur Erde zu elektrochemischer Korrosion (Oxidation) von Leitermaterial kommen. Hierbei gilt: Je höher die (Ableit-) Ströme von einem positiv geladenen Leiter zur Erde sind, desto höher ist die Neigung zu elektrochemischer Korrosion.

Durch fortschreitende Leiterkorrosion kann es zu einer nennenswerten Verringerung des wirksamen Leiterquerschnitts von positiv geladenen Leitern kommen. Bei energietechnischen DC-Systemen mit nennenswerten Lastströmen muss bei einer korrosionsbedingten Querschnittsverringern von Leitern mit einer möglichen zusätzlichen Erwärmung oder sogar mit der Überhitzung von stromführenden Leitern gerechnet werden.

Um Korrosion von Leitern zu verhindern und streustrombedingte Korrosion an anderen leitfähigen Teilen zu verhindern, sollten DC-Stromversorgungssysteme stets so aufgebaut sein, dass unzulässig hohe (Ableit-) Ströme zur Erde oder Streuströme verhindert werden. Deshalb sollen niederohmig geerdete DC-Stromversorgungssysteme grundsätzlich nur an einem einzigen Punkt mit der Erde verbunden sein und der Schutzleiter eines DC-Stromversorgungssystems sollte keine nennenswerten (Ableit-)Ströme führen.

Bei sog. „kombinierten Leitern“ kann es zu Streuströmen und streustrom-bedingter Korrosion kommen.

Kombinierte Leiter in Stromversorgungssystemen (s. a. DIN VDE 0100-100 (VDE 0100-100)):

- PEN-Leiter: Schutzerdungsleiter und Neutralleiter,
- PEM-Leiter: Schutzerdungsleiter und Mittelleiter,
- PEL-Leiter: Schutzerdungsleiter und Außenleiter.

Bei mit Gleichspannung betriebenen TN-C-Systemen ist entweder ein PEM-Leiter oder ein PEL-Leiter vorhanden. Bei PEM- und bei PEL-Leitern kann es zu DC-Streuströmen durch andere leitfähige Teile oder durch die Erde kommen. Um DC-Streuströme und streustrombedingte Korrosion zu verhindern, sollten mit Gleichspannung betriebene Stromversorgungssysteme vorzugsweise als TN-S- oder als IT-Systeme aufgebaut sein.

IT-Stromversorgungssysteme müssen stets mit einer Isolationsüberwachung ausgestattet sein, um Erdschlüsse erkennen zu können.

Bei niederohmig geerdeten DC-Stromversorgungssystemen, bei denen ein aktiver Leiter eine positive Spannung gegen Erde aufweist, erscheint der Einsatz einer Isolations- oder Leckstrom-Überwachungseinrichtung sinnvoll, um möglicherweise entstehende Leiterkorrosion oder Streustromkorrosion erkennen zu können.

Anwendungsbeispiel:

- Um eine mögliche Leiterkorrosion bei mit Gleichstrom betriebenen Telekommunikationsanlagen zu verhindern ist häufig der positive Pol niederohmig geerdet (z. B. 0 V und -48 V). Durch einen Aufbau als TN-S-System werden Streuströme vermieden.

Für Streuströme von Bahnen beschreibt EN 50122-2 (VDE 0115-4) die Anforderungen für deren Minimierung und für die Auswirkungen innerhalb der Bahn.



Abbildung 5 – Oberleitungs-Omnibus [23]

Streustromkorrosion tritt bei mit Gleichstrom betriebenen Anlagen auf. Sie kann vor allem bei Straßen- und U-Bahnen ein Problem darstellen, da bei diesen Systemen meistens die Schienen den 2. Pol bilden, der gegen den Erdboden nicht ausreichend isoliert ist. Eine mögliche Korrosionsschutzmaßnahme ist die Trennung der Erdungssysteme von AC- und DC-Bahnen über Trennfunkstrecken (siehe DIN EN 62561-3 (VDE 0185-561-3)) oder die Nutzung von Spannungsbegrenzungseinrichtungen nach DIN EN 50526-2 (VDE 0115-525-2).

Bei Oberleitungsmasten und Gleisen aus Stahl in Erdböden setzt sich der Korrosionsvorgang aus zwei Teilreaktionen zusammen: der anodischen Teilreaktion der Metallauflösung (Oxidation) und der kathodischen Teilreaktion der Sauerstoffreduktion.

Mit Hilfe von sogenannten Strom-Spannungs-Kurven können die anodische und kathodische Teilreaktion dargestellt und Korrosionsvorgänge bzw. Potentialabhängigkeiten erkannt werden.

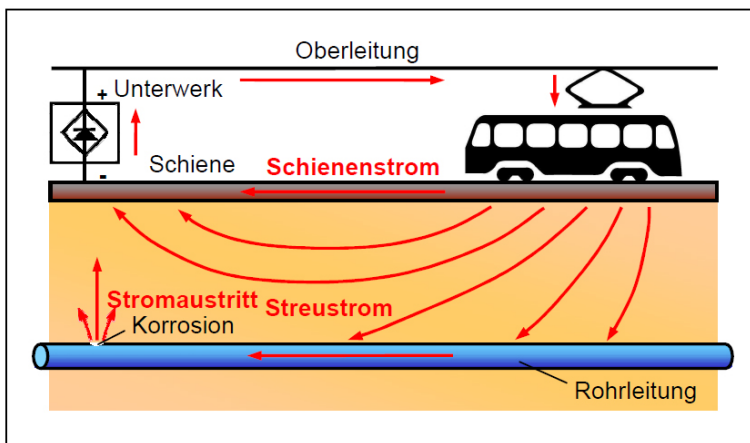


Abbildung 6 – Gefahr der Streustromkorrosion bei einer Gleichstrombahn

Eine weitere Beeinflussung durch Streuströme tritt bei Rohrleitungen auf, die unterhalb gleichstrombetriebener Bahnen verlaufen. Bei diesen Bahnen werden die Fahrschienen zur Rückleitung des Betriebsstromes verwendet, der einen Längsspannungsabfall an den Schienen aber über die Gleisbettung auch am Erdboden erzeugt. Ein Teil dieses Rückstromes kann somit durch den Erdboden fließen und in die Rohrleitung eindringen. Tritt der Streustrom dann in Bereichen mit negativeren Potentialen (z. B. Anschluss des Minuspols des Unterwerks mit den Fahrschienen) wieder aus der Rohrleitung aus, erfolgt verstärkt anodische Korrosion. Daher wird unbedingt empfohlen, den Pluspol zu erden, um die Schäden durch Korrosion zu reduzieren.

Korrosion durch Streustrom

Der von den Fremdstromanoden-Anlagen ausgehende Schutzstrom ist im Bereich der Anodenanlagen am größten und nimmt mit zunehmender Entfernung ab.

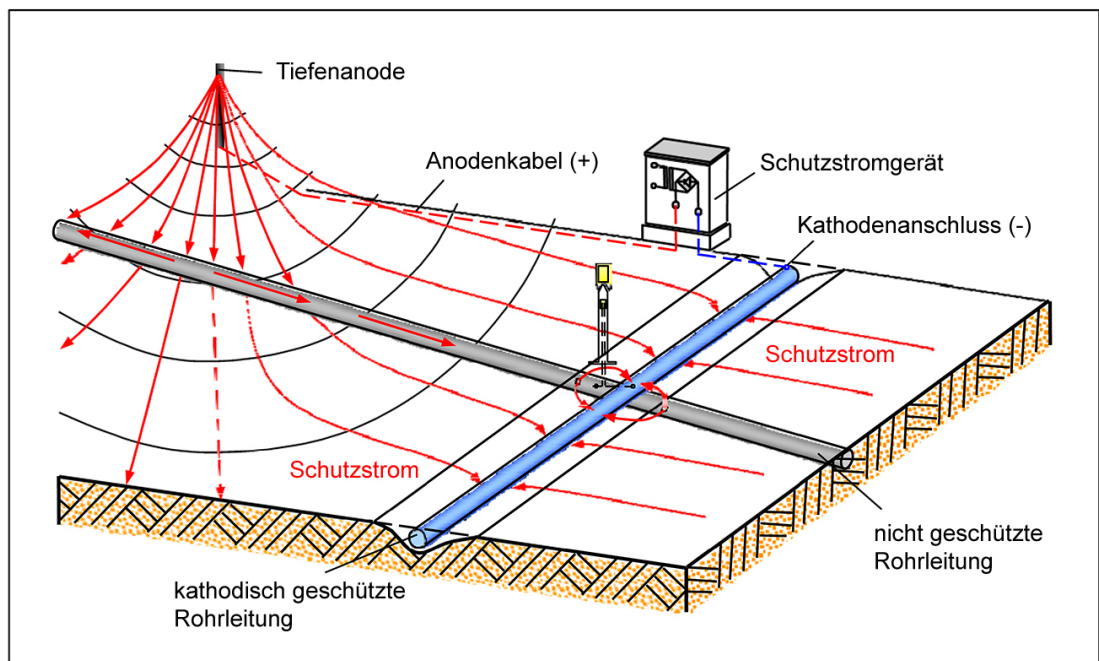


Abbildung 7 – Spannungsverlauf einer Anodenanlage einer geschützten Rohrleitung

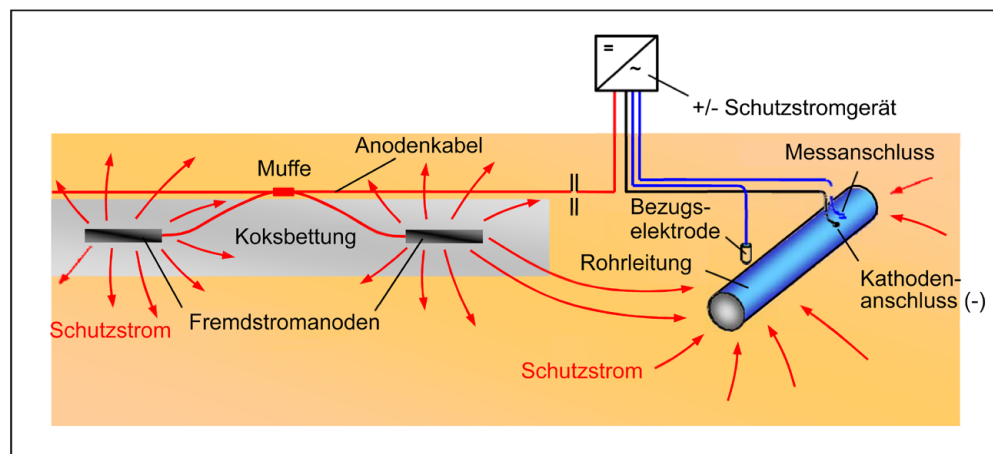


Abbildung 8 – Schutzstrom

Der Schutzstrom fließt dabei von den Anoden über das Erdreich zu den kritischen Bereichen der Rohrleitung, dringt in die beschädigten Stellen der Umhüllung ein und verhindert Korrosion (siehe Abbildung 8).

6.7 Blitz- und Überspannungsschutz

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-X (VDE 0185-305-X) anwendbar. Gleichstromsysteme, die ausschließlich in Fahrzeugen installiert sind, werden hingegen im Anwendungsbereich der Blitzschutznormen explizit ausgeschlossen. Es gelten also auch für DC-Applikationen die primären Blitzbedrohungsparameter aus DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1). Die Frage, ob und in welcher Form Blitz- und Überspannungsschutzmaßnahmen notwendig sind, kann durch eine Risikoanalyse nach DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2) und den zu DIN EN 62305-X (VDE 0185-305-X) gehörenden Beiblättern beantwortet werden. In diesem Zusammenhang sei auch auf die jahrzehntelangen Erfahrungen des GDV mit blitzbedingten Schäden in elektrischen Anlagen hingewiesen. Der GDV gibt u. a. in Form der VdS 2010 (Risikoorientierter Blitz- und Überspannungsschutz) Empfehlungen für die Auswahl von Blitz- und Überspannungsschutz für elektrische Anlagen in unterschiedlichsten Gebäudearten und für unterschiedlichste Nutzungsarten. Solche Empfehlungen können auch im Versicherungsvertrag verbindlich vereinbart werden.

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). Neben den beschriebenen Bedingungen aus der Sicht des Blitzschutzes sind für die Anwendung von SPDs in Gleichstromanlagen jedoch auch die systemeigenen Anforderungen zu berücksichtigen. Diese systembedingten Spezifikationen von DC-SPDs können sich im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Blitzschutzanforderungen für Wechsel- und Gleichstromsysteme in wesentlichen Punkten unterscheiden. Abbildung 9 zeigt die zusammengefassten relevanten Systemparameter für DC-SPDs. Die bestehenden Installationsvorschriften zur Auswahl und zum Einsatz von SPDs, und auch die Produktnormen für SPDs, decken zurzeit ausschließlich den Einsatz in Wechselstromnetzen ab. Aufgrund unterschiedlicher Systemanforderungen können diese nicht uneingeschränkt auf DC-Applikationen übertragen werden. Die besonderen Anforderungen an SPDs in Niederspannungsgleichstromversorgungen werden in der zukünftigen IEC 61643-41 „Surge protective devices connected to low-voltage DC power systems - Requirements and test methods“ beschrieben. Für SPDs zum Einsatz auf der DC-Seite von PV-Anlagen kann die Norm DIN EN 50539-11:2013-12 (VDE 0675-39-11:2013-12) herangezogen werden.

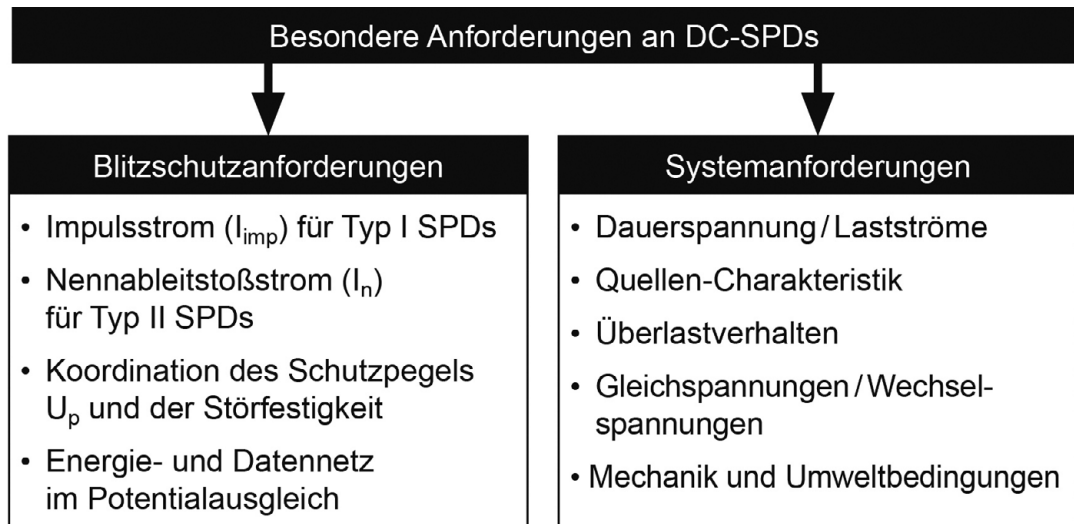


Abbildung 9 – Übersicht der Anforderungen an DC-SPDs [19]

Anhang E der DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1) und DIN EN 62305-4 (VDE 0185-305-4) Beiblatt 1 enthält Regeln zur Ermittlung der Blitzstromverteilung innerhalb einer Anlage. Die dort beschriebenen Grundprinzipien der Blitzstromverteilung für Wechselstromanwendungen können auch für Gleichstromapplikationen zugrunde gelegt werden.

Abbildung 10 zeigt das für DC-Anwendungen angepasste Grundprinzip der Blitzstromverteilung in einer baulichen Anlage mit unipolaren Gleichstromnetz und einem Rückleiter. In ein Gebäude wird ausschließlich eine einzelne Energieleitung, also ein Gleichstromkabel eingeführt. Auf dem Weg zur Erde teilt sich der Blitzstrom I auf zwischen der Erdungsanlage des Gebäudes und der Gleichstromleitung, die über SPDs angeschlossen ist:

$$I_f = k_E \times I \quad \begin{array}{l} I_f = \text{Anteil des Blitzstromes über SPDs in die Gleichstromanlage,} \\ I = \text{Gesamtblitzstrom entsprechend des Gefährdungspegels (LPL, en: lightning protection level),} \\ k_E = \text{Stromteilungsfaktor).} \end{array}$$

Entsprechend der Blitzschutznorm DIN EN 62305-1 gilt: Wenn eingeführte Leitungen (z. B. elektrische und Telekommunikationsleitungen) nicht geschirmt bzw. nicht in Metallkanälen verlegt sind, führt jeder der n' -Leiter der Leitung den gleichen Teil des Blitzstroms. Wenn als erste Näherung angenommen wird, dass die Erdungsimpedanz der Stromversorgung und des vom Blitz getroffenen Gebäudes in etwa gleich sind und somit jeweils die Hälfte des Blitzstromes in die Erdungsanlage und in die Energieversorgungsleitung fließt, dann gilt für den Stromteilungsfaktor bei ungeschirmten Leitungen $k_E = 0,5/n'$ (wobei n' die Gesamtzahl aller Leiter bezeichnet).

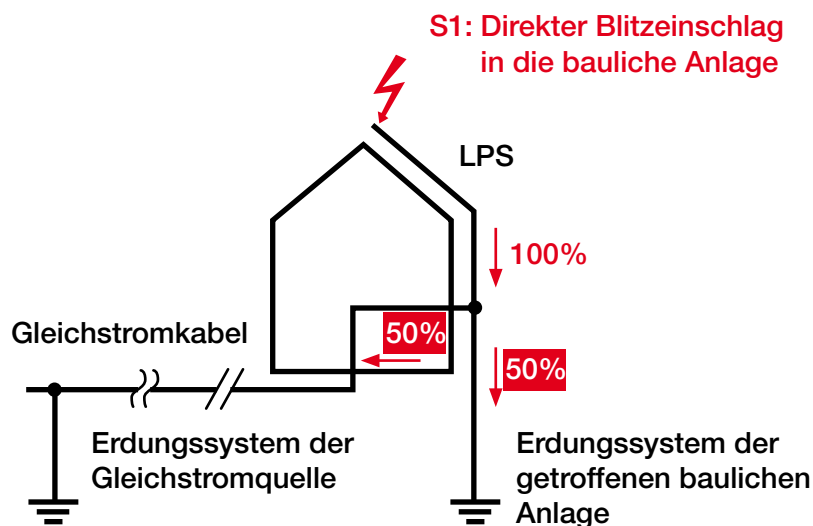


Abbildung 10 – Beispiel für eine Blitzstromaufteilung nach DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1), Anhang E [19]

In Gleichstromsystemen wird das Energiekabel in der Regel nur zwei (+U, N) oder drei (+U, -U, N) Einzelleiter aufweisen. Im Gegensatz zu Drehstromsystemen, in denen sich der Blitzstrom auf die drei Phasenleiter, beziehungsweise bei mitgeführtem Neutraleiter auf vier oder fünf Einzelleiter aufteilen kann. Durch die geringere Zahl der aktiven Leiter in Gleichstromsystemen, im Vergleich zu Drehstromanlagen, lässt sich aus diesem einfachen Beispiel für Typ 1 SPDs in DC-Anlagen ein Blitzstrom von $I_{imp} = 25 \text{ kA } 10/350$ je Schutzpfad ableiten (weitere Beispiele siehe Tabelle 9).

BESCHREIBUNG	n'	I_{imp}
Unipolares Gleichstromnetz mit einem Rückleiter	2 (+U, N)	25 kA
Bipolares Gleichstromnetz mit einem Rückleiter	3 (+U, -U, N)	16.7 kA
Unipolares Gleichstromnetz mit zwei Rückleitern	4 (+U, +U, N, N)	12.5 kA

Tabelle 9 – Beschreibung unterschiedlicher Gleichstromnetze [24]

Die Blitzstromaufteilung in realen und mitunter sehr komplexen Anlagen, wie beispielsweise in PV-Dachanlagen oder PV-Großkraftwerken, kann vom vereinfachten Ansatz mit nur zwei Einzelleitern unter Umständen erheblich abweichen.

Grundsätzlich gilt auch für den Überspannungsschutz von Gleichstromsystemen die allgemeine Forderung, dass der Schutzpegel U_p der SPDs unterhalb der Störfestigkeit der zu schützenden Betriebsmittel liegen muss. Es ist dabei, wie auch bei Wechselstromanlagen, der Schutz zwischen den aktiven Leitern, also in Gleichstromanwendungen zwischen dem Plus- und Minusleiter, und der Schutz zwischen aktiven Leitern und Erde zu unterscheiden. Die Auswahl des U_p kann für den Schutz der aktiven Leiter gegen Erde auch

bei DC-Systemen nach den Regeln der Isolationskoordination erfolgen. Die zukünftige DIN VDE 0100-443 (VDE 0100-443), basierend auf IEC 60364-4-44/A1 von 2015 definiert nun auch Überspannungskategorien für Betriebsmittel mit Nenngleichspannungen. Tabelle 10, die der IEC 60364-4-44/A1 von 2015 entnommen ist, beschreibt die Überspannungskategorien bis einschließlich 1 500 V DC. Diese Bemessungs-Stoßspannungen beschreiben dabei die Steh-Stoßspannungen der Betriebsmittel zwischen den aktiven Leitern und Erde.

NENN- SPANNUNG DER ELEKTRISCHEN ANLAGE ^a [V]	SPANNUNG AUSSENLEITER ZU NEUTRALLEITER ABGELEITET VON DEN NENN- WECHSEL- ODER NENNGLEICH- SPANNUNGEN BIS EINSCHLIESSLICH [V]	GEFORDERTE BEMESSUNGS-STOSSPANNUNG DER BETRIEBSMITTEL ^c [kV]			
		Überspan- nungs- kategorie IV (Betriebsmittel mit sehr hoher Bemessungs- Stoßspannung)	Überspan- nungs- kategorie III (Betriebsmit- tel mit hoher Bemessungs- Stoßspannung)	Überspan- nungs- kategorie II (Betriebsmittel mit normaler Bemessungs- Stoßspannung)	Überspannungs- kategorie I (Betriebsmittel mit geringer Bemessungs- Stoßspannung)
		Zum Beispiel Elektrizitäts- zähler, Rundsteuer- empfänger	Zum Beispiel Verteilertafeln, Schalter, Steckdosen	Zum Beispiel Haushalts- geräte, Werkzeuge	Zum Beispiel empfindliche elektronische Geräte
120/208	150	4	2.5	1.5	0.8
230/400 ^{b, d} 277/480 ^b	300	6	4	2.5	1.5
400/690	600	8	6	4	2.5
1,000	1,000	12	8	6	4
1,500 d.c	1,500 d.c	15	10	8	6

^a Nach der Norm DIN EN 60038 (VDE 0175-1)

^b Diese Bemessungs-Steh-Stoßspannung gilt zwischen den aktiven Leitern und PE.

^c In IT-Systemen, die bei 220-240 V betrieben werden, muss, aufgrund der Spannung gegen Erde, die an einem Leiter bei einem Erdfehler ansteht, die Zeile für 230/400 V angewendet werden.

^d Empfohlene Werte nach Annex D von DIN EN 60664.2.1 (VDE 0110-1 Beiblatt 1):2011.

Tabelle 10 – Überspannungskategorien für DC-Systeme (en: required rated impulse voltage of equipment U_w) [24]

In den jeweiligen Produktstandards können zusätzlich zur DIN EN 60664-1 (VDE 0110-1) weitere Anforderungen festgelegt sein. Die DIN EN 62109-1 (VDE 0126-14-1) gibt Vorgaben für die Stoß-Stehspannung von Wechselrichtern zur Anwendung in photovoltaischen Energiesystemen. Für die Koordination des Ableiterschutzpegels mit der Stoßspannungsfestigkeit von PV-Modulen sind die Stoßspannungsfestigkeiten der Module nach DIN EN 61730-2 (VDE 0126-30-2) zu berücksichtigen. Zudem müssen die unterschiedlichen Lastbedingungen in DC-Kreisen bei SPD-Prüfungen berücksichtigt werden. Hierzu gehören zum Beispiel:

- die Überlastprüfungen (Abtrennprüfung),
- die Arbeitsprüfung eines Funkenstrecken-Typ 1-SPD.

6.8 Abschaltbedingungen

Die in DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410):2007-06 festgelegten Abschaltbedingungen für die automatische Abschaltung der Stromversorgung sind auch für DC-Anwendungen vorhanden. Die max. zulässigen Abschaltzeiten sind abhängig von Spannungsart, Spannungsniveau, Stromsystem und Stromkreisart (Verteilstromkreis, Endstromkreis).

6.9 Isolationskoordination

Luft- und Kriechstrecken werden nach der Basisnorm DIN EN 60664-1 (VDE 0110-1) dimensioniert, wobei hier die Spannungsgrenzen 1 000 V AC und 1 500 V DC gelten. Viele Produktnormen sind von dieser Norm abgeleitet bzw. referenzieren diesen Standard.

Eine weitere Norm, Sicherheitsbestimmungen für elektrische Mess-, Steuer-, Regel- und Laborgeräte – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 61010-1:2010 + Cor.:2011); DIN EN 61010-1, beschreibt die Dimensionierung von Netzstromkreisen ebenfalls bis 1 000 V AC/DC.

6.10 Gerätekoordination/Selektivschutz/Backup-Schutz

Für eine Gerätekoordination/Selektivschutz/Backup-Schutz liegen noch keine Applikationsanforderungen vor. Diese sind noch zu erarbeiten.

6.11 Kennzeichnung von Anlagen und Betriebsmitteln

Die Kennzeichnung von Leitern im DC-Bereich ist durch DIN EN 60445 (VDE 0197) festgelegt.

Generell können drei unterschiedliche Szenarien in halböffentlichen Gebäuden hinsichtlich der Elektroinstallation bzw. der verwendeten Spannungsform unterschieden werden. Zum Ersten kann eine reine Wechselstrominstallation in der Form vorliegen, wie sie dem heutigen Stand der Technik entspricht.

Zweitens kann in Einrichtungen mit hoher positiver (Verbrauch) und negativer (Rückspeisung) pulsformigen Last z. B. ein Gleichspannungsnetz zum Einsatz kommen, da die Wandlung einer Gleichspannung von/nach Wechselstrom/Drehstrom entfallen kann. Dadurch können die Verluste, die mit der Wandlung einhergehen, vermieden werden.



Im dritten Szenario existieren die genannten Spannungsformen parallel. Da für jede Spannungsform eine eigenständige Elektroverteilung verwendet werden muss, sind in Hybridnetzen zwei getrennte Elektroverteilungen anzuwenden, während bei einer reinen Gleichspannungsversorgung oder einer reinen Wechselspannungsversorgung eines Gebäudes/Gebäudeabschnittes nur eine Elektroverteilung anzuwenden ist.

Dies kann dazu führen, dass in einem Technikraum zwei Elektroverteilungen installiert und betrieben werden. Selbst für eine Elektrofachkraft ist es weder äußerlich noch nach dem Öffnen des jeweiligen Schaltschranks sofort zu erkennen, um welche Art der Installation es sich handelt. Dies kann z. B. damit zusammenhängen, dass Leistungsschalter und Sicherungsautomaten für „universal current“ (AC und DC) entwickelt wurden und am Markt verfügbar sind. Derzeit gibt es auch keine exklusiven DC-Kabel, sodass existierende Installationskabel verwendet werden. Somit ist z. B. ein verwendetes NYM-Kabel innerhalb einer Gleichstrom-Installation äußerlich nicht von einem AC-Kabel zu unterscheiden.

Solange die Kennzeichnung von Anlagen, Geräten und Leitungen normativ nicht geregelt ist, wird folgendes empfohlen: Technik-Räume, in denen Anlagen mit Gleichstrom betrieben werden, sollten an der Eingangstür über ein entsprechendes Hinweisschild verfügen. Auf dem Hinweisschild sollte das Spannungsniveau (z. B. „Achtung 380 V DC“) eindeutig ausgewiesen sein.

- Gleiches gilt für Schaltschränke bei „Mischinstallationen“. Die jeweiligen Schaltschränke müssen von außen eindeutig nach Gleich- und Wechselstrom zu identifizieren sein.
- Installationskabel sollten in Kabelschächten oder Kabelkanälen getrennt voneinander geführt werden (z. B. AC-Kabelbund rechts und DC-Kabelbund links auf der Kabelbahn).
- Die Einzelkabel und/oder der Kabelbund sollten in gleichmäßigen Abständen eindeutig z. B. mit Kabel-Etikettenträgern markiert werden. Gleiches gilt für die Kabelenden an der Quelle (Schaltschrank) und dem Verbraucher (Endgerät).

Die elektrotechnische Gleichstrom-Anlage als Ganzes, aber auch die Installation im Detail muss für ortsfremdes Fachpersonal eindeutig zu identifizieren sein.

6.12 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Elektrische Betriebsmittel, die im Rahmen dieser Normungs-Roadmap betrachtet werden, fallen in den Anwendungsbereich des „Gesetzes über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln (EMVG)“.

Der Begriff „Elektromagnetische Verträglichkeit“ (EMV) wird in §3 EMVG näher erläutert:

- **Verträglichkeit** – EMV ist die Fähigkeit eines Betriebsmittels, in seiner elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu arbeiten, ohne elektromagnetische Störungen zu verursachen, die für andere in dieser Umgebung vorhandene Betriebsmittel unannehmbar wären.
- **Störungen** – Elektromagnetische Störung ist jede elektromagnetische Erscheinung, die die Funktion eines Betriebsmittels beeinträchtigen könnte; eine elektromagnetische Störung kann ein elektromagnetisches Rauschen, ein unerwünschtes Signal oder eine Veränderung des Ausbreitungsmediums sein.
- **Störfestigkeit** – Störfestigkeit ist die Fähigkeit eines Betriebsmittels, unter Einfluss einer elektromagnetischen Störung ohne Funktionsbeeinträchtigung zu arbeiten.
- **Umgebung** – Elektromagnetische Umgebung ist die Summe aller elektromagnetischen Erscheinungen, die an einem bestimmten Ort festgestellt werden kann.

EMV ist eine wesentliche „Eigenschaft“ von elektrischen Einrichtungen. Deshalb fordert das EMVG:

- Betriebsmittel müssen nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik entworfen und gefertigt sein.
- Die von Betriebsmitteln verursachten elektromagnetischen Störungen dürfen kein Niveau erreichen, bei dem ein bestimmungsgemäßer Betrieb von Funk- und Telekommunikationsgeräten oder anderen Betriebsmitteln nicht möglich ist.
- Betriebsmittel müssen gegen die bei bestimmungsgemäßem Betrieb zu erwartenden elektromagnetischen Störungen hinreichend unempfindlich sein, um ohne unzumutbare Beeinträchtigung bestimmungsgemäß arbeiten zu können.

Betriebsmittel müssen also eine ausreichende Störfestigkeit gegenüber Störgrößen besitzen, und das Niveau der von Betriebsmitteln erzeugten Störgrößen muss so niedrig sein, dass andere Betriebsmittel nicht in ihrem bestimmungsgemäßen Gebrauch eingeschränkt, gestört oder beschädigt werden. Zusätzlich muss das Niveau dieser Störgrößen so niedrig liegen, dass durch die Störgrößen keine unzumutbaren Gefahren für Menschen, Tiere und für die Umwelt hervorgerufen werden.

Im EMVG wird die Übereinstimmung von Betriebsmitteln mit harmonisierten Normen gefordert:

Stimmt ein Betriebsmittel mit den einschlägigen harmonisierten Normen überein, so wird widerlegbar vermutet, dass das Betriebsmittel mit den von diesen Normen abgedeckten grundlegenden Anforderungen des § 4 übereinstimmt. Diese Vermutung der Konformität beschränkt sich auf den Geltungsbereich der angewandten harmonisierten Normen und gilt nur innerhalb des Rahmens der von diesen harmonisierten Normen abgedeckten grundlegenden Anforderungen.

Für mit Gleichspannung betriebene Betriebsmittel, müssen harmonisierte (EMV-)Normen angewandt werden. Falls vorhandene harmonisierte (EMV-)Normen für mit Gleichspannung betriebene Betriebsmittel nicht anwendbar sind, so müssen vorhandene harmonisierte Normen (z. B.: aus dem Wechselspannungsnetz) entsprechend ergänzt werden oder geeignete neue harmonisierte Normen erstellt werden.



Für die Beurteilung der Störaussendung und Störfestigkeit von elektrischen Betriebsmitteln müssen die Koppungsmechanismen betrachtet werden, über die Störungen eingekoppelt und abgegeben werden können:

- galvanische Kopplung,
- induktive Kopplung,
- kapazitive Kopplung,
- Wellenkopplung,
- Strahlungskopplung.

Durch den zunehmenden Einsatz von empfindlichen elektronischen Betriebsmitteln müssen die Störaussendung und die Störfestigkeit von Betriebsmitteln heutzutage besonders beachtet werden. Deshalb ist die fachgerechte Anwendung von EMV-Maßnahmen ein fester Bestandteil der Planung und des Betriebs von elektrischen Anlagen. Um das Niveau von Störgrößen so niedrig wie möglich zu halten, haben sich in der Praxis folgende EMV-Maßnahmen bewährt:

- geeignete Konstruktion von Betriebsmitteln:
 - Störungsentstehung: Verringerung oder Verhinderung des Entstehens und Aussendens von Störgrößen,
 - Störfestigkeit: Erreichen einer hinreichenden Störfestigkeit,

- Schirmung von Störgrößen erzeugenden Betriebsmitteln,
- Schirmung von empfindlichen Betriebsmitteln gegen Störgrößen,
- Schirmung von Kabeln und Leitungen,
- Filterung,
- EMV-gerechter Aufbau von Schaltschränken,
- EMV-gerechte Verlegung von Kabeln und Leitungen,
- EMV-gerechter Aufbau von Potentialausgleichs- und Erdungssystemen,
- Auswahl und Aufbau von Netzsystemen unter Berücksichtigung von elektrischen Störgrößen,
- Einhaltung von ggf. erforderlichen Abständen zwischen Kabeln und Leitungen,
- Einhaltung von ggf. erforderlichen Abständen zwischen störaussendenden und störimpfindlichen Betriebsmitteln.

Die ersten Wechselspannungs-Stromversorgungssysteme wurden vor mehr als einem Jahrhundert eingeführt. In den ersten Jahrzehnten der „Wechselspannungs-Ära“ wurden hauptsächlich lineare Verbraucher eingesetzt, die im Wesentlichen sinusförmige Lastströme aufnehmen. Seit einigen Jahrzehnten wurden und werden immer mehr nichtlineare Verbraucher in Wechselspannungssystemen eingesetzt, die nicht-sinusförmige Lastströme aufnehmen. Nicht-sinusförmige Lastströme werden häufig von Eingangsschaltungen mit leistungselektronischen Komponenten hervorgerufen. Diese nicht-sinusförmigen Lastströme werden mit Hilfe des Begriffs „Oberschwingungen“ beschrieben. Oberschwingungen können zur Störung oder Überlastung von Betriebsmitteln führen. Um die schädlichen Effekte von Oberschwingungen zu kompensieren, werden Oberschwingungskorrekturfilter/Leistungsfaktorkorrekturfilter (PFC-Filter; en: Power Factor Correction) eingesetzt. Hierbei unterscheidet man:

- passive Oberschwingungsfilter (Passive PFC),
- aktive Oberschwingungsfilter (Aktive PFC).

Aufgrund von gesetzgeberischen Vorgaben und harmonisierten Normen sind leistungselektronische Betriebsmittel ab einer bestimmten Leistungsaufnahme heutzutage immer mit Oberschwingungsfiltern ausgestattet. Diese Oberschwingungsfilter benötigen Platz innerhalb der Gehäuse von Betriebsmitteln, und sie erhöhen die Herstellkosten von Betriebsmitteln. Zudem entstehen sowohl in passiven als auch aktiven Oberschwingungsfiltern elektrische Verluste. Die durch elektrische Verluste in Oberschwingungsfiltern entstehende Verlustwärme muss zusätzlich abgeführt werden.

Im Bereich der industriellen Fertigung wird heutzutage ein erheblicher Anteil der verwendeten elektrischen Energie für den Betrieb von Elektromotoren verwendet. Der Gesetzgeber fordert eine hohe Energieeffizienz für den Betrieb von Elektromotoren. Um den gesteigerten Anforderungen an die Energieeffizienz gerecht zu werden, werden Elektromotoren häufig mit Hilfe von Wechselrichtern betrieben. Der Wechselrichter stellt für drehzahlvariable Antriebe eine Ausgangsspannung mit variabler Wechselspannung und Frequenz zur Verfügung. Wechselrichter können eine wesentliche Quelle für Störgrößen sein. Das muss auch beim Einsatz von Elektromotoren in Gleichspannungs-Stromversorgungssystemen beachtet werden. Deshalb wird nachfolgend auf den grundlegenden Aufbau von Wechselrichtern eingegangen.

Wechselrichter für den Betrieb von AC-Motoren – an einphasigen oder dreiphasigen AC-Stromversorgungssystemen – bestehen häufig aus folgenden Funktionsgruppen:

1. AC-Eingangfilter (en: Power Factor Correction),

2. Gleichrichter-Schaltung (gesteuert oder nicht gesteuert),
3. DC-Zwischenkreis,
4. Wechselrichter-Schaltung (z. B. mit IGBTs; en: Insulated-gate bipolar transistor, Thyristoren, Triacs usw.),
5. AC-Ausgangsfiler.

Viele elektronische Verbraucher (z. B. auch Wechselrichter) verfügen über einen DC-Zwischenkreis. Durch die direkte Speisung des DC-(Zwischen-)Kreises aus einem DC-Stromversorgungssystem verspricht man sich folgende Vorteile:

- Einsparung von AC-Eingangsfiltren (passiven Leistungsfaktorkorrekturfilter, PFC-Filter),
- reduzierte Anzahl an Komponenten,
- erhöhte Energieeffizienz.

Die Wechselrichtungs-Schaltung für den Betrieb von AC-Motoren besteht aus Leistungshalbleitern, welche die Betriebszustände „leitfähig“ oder „gesperrt“ einnehmen können. Diese Leistungshalbleiter können – vereinfacht gesprochen – als Ein- und Ausschalter betrachtet werden, die mit einer hohen Schaltfrequenz betrieben werden können. Bei Wechselrichtern für AC-Motoren liegen die Schaltfrequenzen im Regelfall im unteren kHz-Bereich. Für andere Anwendungen (Versorgungseinrichtungen für die Beleuchtungstechnik, Be- und Verarbeitungseinrichtungen) sind Taktfrequenzen bis in den MHz-Bereich üblich. Einphasige und dreiphasige Wechselrichter-Schaltungen entnehmen immer impulsförmige Ströme (idealisiert: rechteckförmige Ströme) aus dem DC-(Zwischen-)Kreis. Bei den Schaltvorgängen von Leistungshalbleitern in Wechselrichter-Schaltungen können impulsförmige Spannungsspitzen auftreten. Wechselrichter-Schaltungen nehmen Wirkleistung auf, aber sie sind auch gleichzeitig eine nicht vernachlässigbare Quelle für Störgrößen. Das „Strom- und Spannungs-Ausgangssignal“ von Wechselrichter-Schaltungen (ohne nachgeschaltetes AC-Filter) ist hochgradig nicht-sinusförmig. Je nach Typ der Wechselrichter-Schaltung treten – durch die steilen Schaltflanken der leistungselektronischen Komponenten – am Ausgang der Wechselrichter-Schaltung Frequenzen bis in den MHz-Bereich auf.

Wechselrichter sind ausgangsseitig (in Energieflussrichtung) mit einem Ausgangsfiler versehen. Bei der Verwendung von hochwertigen Ausgangsfiltren gelingt es nahezu sinusförmige Spannungen und Ströme in die Verbindungsleitung zum Motor einzuspeisen. Eine Wechselrichter-Schaltung verursacht stets auch höherfrequente Störgrößen, die sich (entgegen der Energieflussrichtung) in Richtung der Stromquelle ausbreiten. Im DC-(Zwischen-)Kreis kann die Amplitude dieser Störungen durch Induktivitäten in Längsrichtung und durch Kapazitäten zwischen den aktiven Leitern verringert werden. Bei Wechselrichtern für AC-Stromversorgungssysteme werden diese – von Wechselrichter-Schaltungen verursachten – Störgrößen zudem wirkungsvoll durch Gleichrichter-Schaltungen und durch AC-Eingangsfiler gedämpft.

Um einen für AC-Stromversorgungssysteme konstruierten Wechselrichter in DC-Stromversorgungssystemen einzusetzen, reicht es nicht aus, lediglich die AC-Eingangsschaltung und die Gleichrichter-Schaltung „wegzulassen“. Ein hinreichend wirksames DC-Eingangsfiler ist erforderlich.

Wechselrichter für den Betrieb von AC-Motoren, in DC-Stromversorgungssystemen, bestehen aus folgenden Funktionsgruppen:

1. DC-Eingangsfiler,
2. DC-Zwischenkreis,

3. Wechselrichter-Schaltung (z. B. mit IGBTs, Thyristoren, Triacs usw.),
4. AC-AusgangsfILTER.

Bei DC-Betriebsmitteln mit Kondensatoren kann es ggf. auch nach dem Abschalten bzw. Freischalten zum Auftreten von berührgefährlichen Rückspannungen kommen. Deshalb müssen DC-Betriebsmittel so aufgebaut sein, dass keine berührgefährlichen Rückspannungen entstehen können.

Mit Gleichspannung betriebene Wechselrichter sind bereits für eine Vielzahl von Anwendungen im Einsatz. Die Betriebsspannungen können vom Bereich der Kleinspannung bis in den Bereich von mehreren Kilovolt reichen. Bei Wechselrichtern mit höheren Lastströmen muss tendenziell mit einem höheren Maß an Störaussendungen gerechnet werden. Der Betrieb von Wechselrichtern (DC/AC-Wandler) an DC-Stromversorgungssystemen wird nachfolgend an Beispielen erläutert.

Beispiele für DC/AC-Wandler

- Beispiel 1:

Elektrische Bahnen werden häufig mit Spannungen zwischen 500 V DC und 3 000 V DC betrieben. Die Leistungsaufnahme eines Straßenbahn-Triebwagens beträgt mehrere hundert Kilowatt und die Stromaufnahme aus der Oberleitung kann ein Kiloampere übersteigen. Die aktuelle Generation von Straßenbahn-Triebwagen ist mit Wechselrichtern ausgestattet, die nennenswerte Störungen im funkfrequenten (hochfrequenten) Bereich des Spektrums verursachen. Diese funkfrequenten Störungen werden von Straßenbahn-Triebwagen abgestrahlt und z. T. galvanisch in das DC-Stromversorgungssystem eingespeist. Die Oberleitung und die Schienen wirken hier wie eine Antenne. Das Frequenzspektrum, der durch Wechselrichter von Straßenbahnen verursachten funkfrequenten Störungen, reicht bis in den niedrigen MHz-Bereich hinein. Dies ist leicht nachvollziehbar, wenn man sich z. B. neben einer (Wirkleistung aufnehmenden) Straßenbahn im Auto befindet und Radio hört. Der UKW-Empfang ist im Regelfall nicht gestört. Hingegen ist der Mittelwellen-Empfang im Regelfall stark gestört. In Deutschland spielt der MW-Radioempfang keine nennenswerte Rolle mehr. Jedoch wird der MW-Radioempfang in anderen Teilen der Welt intensiv genutzt, z. T. mit steigender Tendenz. Die Dämpfung der von durch Straßenbahn-Wechselrichtern verursachten „Störgrößen“ ist in vielen Fällen nicht ausreichend und kann zu einer nicht zufriedenstellenden Funktion anderer elektrischer Einrichtungen führen.

- Beispiel 2:

Ein weiteres Beispiel für DC/AC-Wandler sind PV-Wechselrichter. Die PV-Module liefern eine Gleichspannung, die dann in eine einphasige oder dreiphasige Wechselspannung gewandelt wird. Die Wechselrichter-Schaltungen und die AC-AusgangsfILTER von PV-Wechselrichtern sind so ausgelegt, dass die Störaussendungen in Richtung des AC-Stromversorgungssystems hinreichend niedrig sind und den Anforderungen von harmonisierten (EMV-)Normen gerecht werden. Auf der Eingangsseite von PV-Wechselrichtern sind die PV-Module angeschlossen. Die EingangsfILTER von PV-Wechselrichtern sind so ausgelegt, dass die Störaussendung in Richtung der PV-Module hinreichend niedrig ist.

- Beispiel 3:

In den letzten Jahren gewinnen Elektroautos eine immer größere Bedeutung. Die Batteriespannung von modernen Elektroautos beträgt mehrere hundert Volt DC. Die Leistungsaufnahme kann zum Teil deutlich mehr als 100 kW betragen und die Stromaufnahme aus der Batterie kann 100 A übersteigen. Moderne PKWs sind mit Bussystemen und empfindlicher Bordelektronik ausgestattet. Durch den Betrieb des elektrischen Antriebs

– bestehend aus Antriebs-Batterie, Wechselrichter und Antriebsmotoren – dürfen weder die Bordelektronik noch andere elektrische Einrichtungen außerhalb eines Elektrofahrzeugs gestört werden. Um dieses Ziel zu erreichen, setzen die Hersteller von Elektrofahrzeugen störungsarme Wechselrichter und DC-taugliche Filterschaltungen ein. Zudem werden bei Elektrofahrzeugen umfangreiche Schirmungsmaßnahmen durchgeführt.

Handlungsempfehlungen:

- Das EMV-Verhalten von universell einsetzbaren und skalierbaren DC-Stromversorgungssystemen, mit einer Vielzahl unterschiedlicher DC-Stromquellen und DC-Verbrauchern, muss weiter erforscht werden.
- EMV-Grenzwerte, für universell einsetzbare und skalierbare DC-Stromversorgungssysteme, müssen festgelegt werden.
- EMV-Normen, in welchen der Betrieb von universell einsetzbaren DC-Stromversorgungssystemen und den entsprechenden DC-Stromquellen und DC-Verbrauchern geregelt ist, müssen ergänzt oder erstellt werden, ebenso wie die entsprechenden Geräthenormen.
- Um bei einem Umstieg von AC auf DC deutliche Einspareffekte in Hinblick auf den benötigten Platz und in Hinblick auf die Herstellkosten von DC-tauglichen Geräten zu erzielen, werden platzsparende und kostengünstige DC-Filter benötigt, die für den wirkungsvollen Einsatz in mit DC versorgten Betriebsmitteln geeignet sind.



6.12.1 Wechselwirkung EMV-Filter und Isolationsüberwachungseinrichtungen

Sind in einem IT-System hohe Netzableitkapazitäten vorhanden, so ist bei der Auswahl der Geräte darauf zu achten, dass das Messverfahren des Isolationsüberwachungsgerätes darauf abgestimmt bzw. geeignet ist. Isolationsüberwachungsgeräte mit dem Messprinzip „Gleichspannungsüberlagerung“ sind für diese Anwendungen meist nicht geeignet.

6.12.2 Interoperabilität/gegenseitige Beeinflussungen

Ursachen für Beeinflussungen

Werden mehrere elektrische Betriebsmittel gemeinsam an einem Netz betrieben, so kann es zu gegenseitigen Beeinflussungen kommen. Beeinflussungen können z. B. sein:

- Funktionseinschränkungen,
- Funktionsstörungen,
- Beschädigungen durch Überspannungen, die durch die gegenseitige Beeinflussung entstehen,
- verringerte Lebensdauer durch zusätzliche Belastungen.

Mit einer gegenseitigen Beeinflussung muss immer dann gerechnet werden, wenn es im jeweiligen Netz zu Betriebszuständen kommt, bei denen Spannungen und Ströme von den Sollzuständen abweichen. Mögliche Beeinflussungen können z. B. sein:

- temporäre Überspannungen/Unterspannungen,
- transiente Spannungseinbrüche,
- transiente Überspannungen durch Schalthandlungen,
- erhöhte Einschaltströme,
- Überlast,

- Unterlast,
- Kurzschlüsse,
- Erdschlüsse,
- niederfrequente und hochfrequente leitungsgebundene Störungen:
 - Bei AC: synchron und nicht-synchron zur Netzfrequenz,
 - Bei DC: nicht-synchron (zur Netzfrequenz),
- Oberschwingungen,
- Schwebungen,
- Resonanzerscheinungen.

Störaussendung und Störfestigkeit

Viele der o. g. Beeinflussungen sind seit langer Zeit aus AC-Netzen bekannt, und es existieren bewährte Methoden um gegenseitige Beeinflussungen von AC-Betriebsmitteln so zu kontrollieren, dass ein zufriedenstellender Betrieb möglich ist. Es gibt jedoch auch Beeinflussungen die nur mit erhöhtem Aufwand kontrolliert werden können. Hierzu zählen insbesondere nieder- und hochfrequente Störungen und auch Resonanzerscheinungen. Um die Auswirkungen von diesen Beeinflussungen beherrschen zu können, müssen folgende Bedingungen erfüllt werden:

- Die Störaussendung von Betriebsmitteln muss so niedrig sein, dass es nicht zu einer Funktionseinschränkung oder Störung anderer Betriebsmittel kommt.
- Die Störfestigkeit von Betriebsmitteln muss so hoch sein, dass es durch die von anderen Betriebsmitteln zu erwartenden Störaussendungen nicht zu einer Funktionseinschränkung oder Störung des jeweiligen Betriebsmittels kommt.

Oberschwingungen und Schwebungen

In den letzten Jahren und Jahrzehnten wurden mehr und mehr AC-Verbraucher eingesetzt, die z. T. stark nicht-sinusförmige Lastströme aufnehmen. Nicht-sinusförmige Lastströme führen zu einer Belastung von Netzen und Betriebsmitteln mit Oberschwingungen (Harmonischen). Im einfachsten Fall ist die Frequenz einer Oberschwingung ein ganzzahliges Vielfaches der Netzfrequenz – die Oberschwingung ist also synchron zur Netzfrequenz. Netzsynchrone Oberschwingungen können im Regelfall leicht mit bewährten Maßnahmen – wie z. B. passiven oder aktiven Oberschwingungsfiltren – beherrscht werden.

Bei AC-Verbrauchern mit gesteuerten Gleichrichtern können, in Abhängigkeit vom jeweiligen Schaltungsaufbau und dem Betriebszustand des Gleichrichters, auch Oberschwingungen auftreten deren Frequenz kein ganzzahliges Vielfaches der Netzfrequenz ist. Diese Oberschwingungen sind also nicht-synchron zur Netzfrequenz. Solche nicht-synchronen Oberschwingungen werden auch „Zwischenharmonische“ genannt. Erzeugen mehrere Betriebsmittel an einem Netz gleichzeitig nicht-synchrone Oberschwingungen, so überlagern sich diese nicht-synchronen Schwingungen. Unter ungünstigen Bedingungen können nicht-synchrone Oberschwingungen sog. Schwebungen hervorrufen und Funktionsstörungen oder auch Resonanzerscheinungen verursachen.

In DC-Netzen gibt es naturgemäß keinen Nulldurchgang der Spannung. Somit gibt es auch keine Netzfrequenz, mit deren Hilfe die durch elektronische Schaltungen hervorgerufenen Oberschwingungen und Störungen synchronisiert werden könnten. Auch in DC-Netzen treten Oberschwingungen und höherfrequente Störungen auf, jedoch ohne dass sie zu einer bestimmten Frequenz synchronisiert sind.

Bei den meisten neu in Betrieb genommenen DC-Netzen kommen überwiegend Betriebsmittel mit leistungselektronischen Eingangsschaltungen und Ausgangsschaltungen zum Einsatz:

- Betriebsmittel mit höherer Leistungsaufnahme:
 - typische Geräte: Frequenzumrichter usw.,
 - typische Taktfrequenzen: 2...25 kHz.
- Betriebsmittel mit niedriger Leistungsaufnahme:
 - typische Geräte: Kleinverbraucher, Notebook-Netzteile, DC/DC-Spannungswandler zur Platinenmontage,
 - typische Taktfrequenzen: 2...25...1000 kHz; auf Grund technologischer Weiterentwicklungen werden heutzutage – insbesondere bei Spannungswandlern zur Platinenmontage – Taktfrequenzen im Bereich mehrerer 100 kHz erreicht.

Zur Regulierung der Leistungsabgabe von Stromquellen und zur Regulierung der Leistungsaufnahme von Stromverbrauchern wird oft das Verfahren der PWM angewandt. Auf Grund der Taktung von leistungselektronischen Komponenten und auf Grund der PWM entstehen innerhalb von leistungselektronischen Betriebsmitteln leitungsgebundene Störungen mit Frequenzen im Bereich weniger kHz bis hin zum niedrigen MHz-Bereich.

Eigenresonanz

Die typischen Taktfrequenzen von leistungselektronischen Betriebsmitteln liegen im Bereich ein- und mehrstelliger kHz Frequenzen. Vernachlässigt man, aus Gründen der Vereinfachung, die durch Schalthandlungen entstehenden Störungen und die Einflüsse durch Störungen aus dem AC-Netz (via Gleichrichtung), so sind in DC-Netzen leitungsgebundene Störungen unterhalb von 2 kHz im Regelfall nicht zu erwarten.

Werden in einem DC-Netz mehrere einspeisende DC/DC-Wandler als Stromquellen parallel betrieben, so kann es unter ungünstigen Umständen zum Schwingen der von DC/DC-Wandlern eingespeisten Leistung und zum Schwingen der DC-Netzspannung kommen. Die Schwingungsfrequenzen dieser ungewünschten Schwingungen (Schwebungen) können z. T. deutlich niedriger sein als die Taktfrequenzen der einzelnen Wandler. Ursachen für diese ungewünschten Schwingungen können z. B. sein:

- mangelhafte Aufteilung der einzuspeisenden Leistungen auf die einspeisenden Wandler – insbesondere bei Laständerungen,
- nicht-synchronisierte Taktfrequenzen von parallel einspeisenden Wandlern,
- nicht-synchronisierte Taktfrequenzen von parallel betriebenen DC-Verbrauchern (DC/DC-Wandler, DC/AC-Umrichter).

Bei der Planung von DC-Anlagen mit mehreren Einspeisungen müssen nicht nur bereits vorhandene DC/DC-Wandler oder AC/DC-Wandler berücksichtigt werden, sondern ggf. auch zu einem späteren Zeitpunkt hinzuzufügende Wandler, wie z. B. DC/DC-Wandler für die Einspeisung von Energie aus PV-Modulen. Wandler müssen deshalb so konstruiert sein und ausgewählt werden, dass es beim Parallelbetrieb nicht zum Schwingen der in ein DC-Netz eingespeisten Leistung bzw. der Netzspannung kommen kann.

In einem AC-Niederspannungsnetz, das nicht mit einer Kompensationsanlage ausgestattet ist, liegt die Eigenresonanzfrequenz des Netzes normalerweise im Bereich zwischen 50 und 250 kHz. Die Eigenresonanzfrequenz von AC-Netzen mit Kompensationsanlagen kann z. T. deutlich unter 2 kHz liegen – also in einem Frequenzbereich in dem es zur Eigenresonanz durch Oberschwingungen niedriger Ordnung kommen kann.

Gerät ein Stromversorgungsnetz – z. B. durch die Anregung mit Oberschwingungen oder anderen höherfrequenten Schwingungen – in Eigenresonanz, so kann es zu resonanzbedingten Überspannungen und Überströmen kommen, deren Momentanwerte die Belastungsgrenzen von typischen Betriebsmitteln deutlich übersteigen können.

Leistungselektronische Betriebsmittel in DC-Netzen werden nicht durch die „Netzfrequenz“ synchronisiert, und es kann in einem DC-Netz zu einer Überlagerung von nicht-synchronisierten leitungsgebundenen Störungen kommen. Hierbei können sich Schwebungen ausbilden, die ebenfalls zu Eigenresonanz eines DC-Netzes führen können.

Eigenresonanzfrequenzen im Bereich zwischen 50 und 250 kHz können bei DC-Netzen erwartet werden, wenn im Netz keine nennenswerten Glättungskondensatoren vorhanden sind. Praxiserfahrungen mit ausgedehnten DC-Netzen auf Binnenschiffen haben gezeigt, dass die Eigenresonanzfrequenz eines DC-Netzes durch die Verwendung von Glättungskondensatoren in den Bereich zwischen 2 und 20 kHz absinken kann – also in einen Frequenzbereich in dem es z. B. durch die in leistungselektronischen Betriebsmitteln entstehenden leitungsgebundenen Störungen zu einer Ausbildung von resonanzbedingten Überspannungen und Überströmen kommen kann. Durch das Zuschalten bzw. Abschalten von DC-Energiequellen und DC-Verbrauchern kann sich die Eigenresonanzfrequenz eines DC-Netzes signifikant ändern.

Filter

Um die Ausbreitung von leitungsgebundenen Störungen zu verhindern, die innerhalb von leistungselektronischen Betriebsmitteln entstehen, und um wirkungsvoll Resonanzerscheinungen unterbinden zu können, müssen alle Ausgangsschaltungen von leistungselektronischen DC-Stromquellen und alle Eingangsschaltungen von DC-Stromverbrauchern mit geeigneten DC-Filtern ausgestattet sein.

Überspannungsschutzgeräte

Durch tonfrequente Störungen im Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz und hochfrequente Störungen mit einer Frequenz von ca. 10 kHz bis 30 MHz kann es in spannungsbegrenzenden Komponenten von SPDs zur Ausbildung von ungewünschten Leckströmen kommen und ggf. zu einer Schädigung von SPDs. DC-Betriebsmittel müssen deshalb so konstruiert werden und so ausgewählt werden, dass es nicht zu Ausbildung von unzulässig hohen Leckströmen innerhalb der in DC-Systemen verwendeten SPDs kommen kann.

Trägerfrequenzanlagen (TFA) und Power-Line-Communication (PLC)

AC-Niederspannungsanlagen werden heutzutage in vielfältiger Weise genutzt, um Daten mit Hilfe von TFA zu übertragen (siehe DIN EN 50065-1, VDE 0808-1 (2012-01)). Dabei werden der Versorgungsspannung analoge oder digitale Signale überlagert.

Die Nutzung von TFA soll auch in DC-Niederspannungsanlagen möglich sein. Deshalb müssen die Betriebsmittel in DC-Anlagen so ausgelegt werden, dass TFA auch in DC-Niederspannungsanlagen störungsfrei betrieben werden können.

Beispiele für TFA sind:

- Tonfrequenz-Rundsteueranlagen,
- Auslesen von Stromzählern,

- Babyphone,
- Power-Line-Communication (mit Ethernet).

Die Anwendung von TFA in DC-Netzen kann auch für folgende Anwendungen zum Einsatz kommen:

- Laderegulierung von Batteriesätzen,
- Lademanagement für einzelne Batteriezellen,
- Lastmanagement für einspeisende AC/DC oder DC/DC-Wandler – bei Mehrfach-Einspeisung,
- Lastmanagement für Verbraucher – in Abhängigkeit von der im DC-Netz zur Verfügung stehenden Energiemenge und in Abhängigkeit von Versorgungs-Prioritäten für einzelne Verbrauchergruppen,
- Zentrale Ermittlung des Stromverbrauchs einzelner Betriebsmittel – wenn Betriebsmittel mit entsprechenden Messeinrichtungen und TFA-Schnittstellen ausgerüstet sind.

Normung

Störaussendungen durch Oberschwingungen oder andere Störungen müssen durch die Festlegung und Einhaltung von geeigneten Grenzwerten beherrscht werden. Oberschwingungen und andere Störungen sind nicht nur für AC-Netze von Bedeutung, sondern müssen auch bei DC-Netzen beachtet werden. Im Gegensatz zu den Festlegungen für Störfestigkeiten gibt es aktuell in energietechnischen Normen z. T. noch erhebliche Lücken für die Festlegung von Grenzwerten für Störaussendungen von leitungsgebundenen Störungen im Frequenzbereich zwischen 2 und 150 kHz. Fehlende Grenzwerte in diesem Frequenzbereich sind ein wesentlicher Grund für die zu beobachtende Zunahme von Funktionseinschränkungen oder Funktionsstörungen durch leitungsgebundene Störungen in AC- und DC-Netzen.

Normen für die Festlegung von Grenzwerten für Störaussendungen von leitungsgebundenen Störungen im Frequenzbereich zwischen 2 und 150 kHz sind z. Zt. in Arbeit. Störungen in diesem Frequenzbereich werden manchmal auch als „Supraharmonische“ bezeichnet.

Im Anwendungsbereich der Empfehlungen der ITU (en: International Telecommunication Union) gibt es bereits Festlegungen für Grenzwerte von DC-Stromversorgungsausgängen im Frequenzbereich von 25 Hz bis 150 kHz (siehe ITU-T K.76).

DIN EN 61800 enthält Festlegungen für die max. zulässigen Störaussendungen von drehzahlveränderbaren elektrischen Antrieben (Umrichtern) und Festlegungen für erforderliche Unempfindlichkeit gegenüber Störungen und verweist dabei auf die Normenreihe DIN EN 61000-xx.

Normen:

- ITU-T K.76 (2008-07): EMC requirements for telecommunication network equipment,
- DIN EN 61800-3, VDE 0160-103 (2015-08): Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe – Teil 3: EMV-Anforderungen einschließlich spezieller Prüfverfahren (IEC 22G/297A/CD:2015),
- DIN EN 61000-2-2, VDE 0839-2-2 (2003-02): Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 2-2: Umgebungsbedingungen; Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen,
- DIN EN 61000-4-16 VDE 0847-4-16 (2016-10): Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-16: Prüf- und Messverfahren – Prüfung der Störfestigkeit gegen leitungsgeführte, asymmetrische Störgrößen im Frequenzbereich von 0 Hz bis 150 kHz (IEC 61000-4-16:2015),

- DIN EN 61000-4-17/A2 VDE 0847-4-17/A2 (2009-11): Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-17: Prüf- und Messverfahren - Prüfung der Störfestigkeit gegen Wechselanteile der Spannung an Gleichstrom-Netzanschlüssen (IEC 61000-4-17:1999/A2:2008),
- DIN EN 61000-4-29 VDE 0847-4-29 (2001-10): Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-29: Prüf- und Messverfahren; Prüfungen der Störfestigkeit gegen Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen an Gleichstrom-Netzeingängen (IEC 61000-4-29:2000),
- DIN EN 50065-1, VDE 0808-1 (2012-01): Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich 3 kHz bis 148,5 kHz – Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Frequenzbänder und elektromagnetische Störungen.

Handlungsempfehlungen

- Regeln für die Sicherstellung der Anlagen-EMV bei DC-Netzen müssen erarbeitet werden.
- Es muss geprüft werden, ob und inwieweit Festlegungen bezüglich maximal zulässiger Störaussendungen und Störfestigkeiten aus bereits vorhandenen Normen aus AC-Anwendungen für DC-Stromversorgungssysteme genutzt werden können.
- Das Niveau der von DC-Betriebsmitteln abgegebenen leitungsgebundenen tonfrequenten und hochfrequenten Störungen muss so niedrig sein, dass unzulässig hohe Leckströme durch Überspannungsschutzgeräte sicher vermieden werden. Anzudenken wäre hier, vorbehaltlich einer Validierung, die Übernahme der Normen für Wechselspannungssysteme (DIN EN 55013, 55011, 55014, 55015, 55022, ...).
- Die Betriebsmittel in DC-Anlagen müssen so ausgelegt werden, dass TFA auch in DC-Niederspannungsanlagen betrieben werden können.
- Eine Norm für die „Signalübertragung auf elektrischen DC-Niederspannungsnetzen“ muss erstellt werden (analog zu: DIN EN 50065-1, VDE 0808-1 (2012-01)).

6.12.3 Interoperabilität in Gleichspannungsnetzen

Werden elektrische Geräte an einem gemeinsamen Versorgungsstrang des Netzes betrieben, so kann es zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Geräte kommen und die Funktion der Betriebsmittel beeinträchtigt werden. Eine Beeinflussung begründet sich in leitungsgeführten nieder- und hochfrequenten Störungen, die zwischen Betriebsmitteln übertragen werden. Zu hohe Störemissionen eines Betriebsmittels und/oder eine zu hohe Empfindlichkeit (Immissionsfestigkeit) eines Betriebsmittels können eine Interoperabilität verhindern. Die beschriebene Wechselwirkung, die zur Interoperabilität führt, tritt sowohl in Wechselspannungsnetzen als auch in Gleichspannungsnetzen auf.

In Wechselspannungsnetzen kann es zudem zu Störungen kommen, die sich in der Gleichrichtung der Wechselspannung bedingen. Diese niederfrequenten Störungen im Frequenzbereich bis 2 kHz entsprechen dem vielfachen der Netzfrequenz. Die netzfrequenzbezogenen Störemissionen treten in einem Gleichspannungsnetz nicht auf, da hier keine Leistungsübertragung mittels einer Wechselgröße zur Anwendung kommt.

Weitere Störungen gehen von dem Umrichter und dem Schaltverhalten der verwendeten Halbleiterschalt Elemente aus. Dadurch entstehen Störungen zum einen durch die Taktfrequenz im Bereich von einigen kHz bis ca. 25 kHz. Diese hochfrequenten Störungen können durch den Einsatz von EMV-Filtern eliminiert werden. Entsprechendes gilt auch für die Anwendung von DC/DC-Wandlern.

Im mittleren Frequenzbereich entstehen Intermodulationsprodukte aus der Primärfrequenz des Ausgangsstromes des Wechselrichters und der Netzfrequenz, sogenannte Supraharmonische. Durch geeignete Modulationsverfahren und eine geeignete Filterauslegung sowie des Gleichspannungszwischenkreises können diese Anteile unterdrückt werden. Bei der Speisung eines Umrichters mit einer Gleichspannung treten nur die Anteile der Primärfrequenz des Umrichterausgangsstromes auf, Intermodulationsprodukte treten nicht auf.

Die Interoperabilität kann in einem Gleichspannungsnetz genauso wie in einem Wechselspannungsnetz gewährleistet werden, jedoch unter der Voraussetzung, dass gegebene Standards eingehalten werden.

6.12.4 EMV-Filter und Schutzmaßnahmen

Ungeachtet der Netzspannungsform muss, konform zu geltenden normativen Vorgaben, der Personenschutz und Leitungsschutz in einem elektrischen Verteilnetz gewährleistet sein. Je nach Netzform (TT, TN, IT) können unterschiedliche Schutzmaßnahmen zum Einsatz kommen. Diese sind aus der IEC 60364-1 bekannt.

Betrachtet man die Ausführung von EMV-Eingangsfiltren von elektrischen Betriebsmitteln, so weisen diese in der Regel einen charakteristischen Aufbau auf. Zur Unterdrückung von unsymmetrischen EMV-Störungen wird ein Entstörkondensator zwischen den Eingangsleitern eingefügt (X-Kondensator). Die symmetrischen Störungen werden durch zwei Kondensatoren, die zwischen den jeweiligen Leitern und dem Erdanschluss angebracht sind, unterdrückt (Y-Kondensator). Zusätzlich kommen noch induktive Bauelemente zum Einsatz.

Weisen an den Netzstrang angeschlossene Betriebsmittel zu hohe Ableitströme auf, kann es zu einer automatischen Abschaltung durch den RCD dieses Netzstranges kommen. Ableitströme in einem Gleichspannungsnetz sind kapazitive Ableitströme, die durch Netzrippel und hochfrequente Anteile entstehen.

Die Maximalwerte der Ableitströme sollten in Analogie zu AC normativ festgelegt werden.

Nach dem Abschalten eines Netzstranges im Falle eines Fehlerstromes kann eine Rückspannung in dem betreffenden Netzzweig auftreten, sowohl im Wechselspannungsnetz als auch im Gleichspannungsnetz. Diese tritt dann auf, wenn beispielsweise Solarumrichter an den betreffenden Netzzweig angeschlossen sind. Restspannungen können aber auch durch Entstörkondensatoren in EMV-Filtern auftreten, die nicht mit einem Entladewiderstand versehen sind. Sind nur Verbraucher – gleich welcher Art – durch einen Netzstrang versorgt, so kann die in den Filterkondensatoren gespeicherte Energie zu einer Rückspannung auf dem Netzstrang führen. Durch normative Vorgaben hinsichtlich eines Entladewiderstandes parallel zu dem Filterkondensator am Eingang wird diese Spannung entladen. Diese Betrachtung gilt sowohl für ein Gleichspannungsnetz als auch für ein Wechselspannungsnetz.

Im Gegensatz zu den beschriebenen Anwendungen im Haushalts- und Bürobereich können Industrienetze oder Netze in Schiffen eine leicht abgewandelte Anforderung aufweisen. Dabei sind die grundlegenden Effekte jedoch identisch.



7.1 Topologie/Architektur LVDC

7.1.1 Systemdefinition

Im Rahmen dieses Abschnittes werden einzelne DC-Systeme untersucht. Dabei handelt es sich jeweils um in sich geschlossene Systeme einer Spannungsebene (oder eines Spannungsbandes). Diese Systeme können allerdings mit unter- oder übergeordneten Systemen in Verbindung stehen.

7.1.1.1 Netztopologien

Für DC-Systeme wurden bislang eine Reihe von Topologien vorgestellt, allerdings wurden nicht alle in der Normung berücksichtigt. Neben Inselnetzen, die überhaupt nicht mit dem Versorgungsnetz verbunden sind, gibt es auch DC-Netze die vollständig aus dem öffentlichen AC-Netz versorgt werden.

Zusätzlich zu diesen beiden Netzformen gibt es verschiedenste Arten der Verzweigung, Vermaschung und des dynamischen Wechsels zwischen ON/Off-Grid-Betrieb. Bei diesen Topologien werden die Netzeigenschaften überwiegend durch das Zusammenspiel zwischen Batterien und den Wandler-Systemen (z. B. Kurzschlussleistung, Steuer- und Regelungsgüte, Spannungsqualität) bestimmt, z. B. wird bei PV-Anlagen immer häufiger eine DC-Kopplung zwischen Wandler-Systemen (DC-DC-Wandler), Batteriespeichern, Ladevorrichtungen und der Last eingesetzt.

In der Arbeitsgruppe CAG1 des Systemkomitees IEC SyC LVDC werden aktuell verschiedene Use Cases für unterschiedliche neu zu betrachtende Topologien ausgearbeitet. Beispiele für bereits angewendete Normen, die sich auf LVDC-Topologien beziehen sind:

- DIN EN 62040-5-3 (VDE 0558-550-3) Unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme (USV);
- E DIN EN 50171 (VDE 0558-508) Zentrale Sicherheitsstromversorgungssysteme.

7.1.1.2 Qualitative Anforderungen (Stabilität, Lastanforderungen, Ripple, Redundanz/Verfügbarkeit)

Prinzipiell sind Aussagen zu qualitativen Anforderungen bzgl. Stabilität, Lastverhalten, Ripple sowie Redundanz und Verfügbarkeit von DC-Netzen in verschiedenen anwendungsspezifischen Normen sowie firmeneigenen Spezifikationen von Systemlieferanten zu finden. Beispiele hierfür sind u. a. im zivilen Bereich die ABD0100.1.8 „Electrical and Installation Requirements“ von AIRBUS und die DIN EN 50155 „Bahnanwendungen – Elektronische Einrichtungen auf Bahnfahrzeugen“. Im militärischen Bereich gibt es Normen wie die MIL-STD1275 „Characteristics of 28 Volt DC Electrical Systems in Military Vehicles“, die VG96916-5 „Elektrische Bordnetze für Landfahrzeuge – Teil 5: Gleichspannungsbordnetze“, die MIL-PRF-GCS600A „Characterization of 600V DC Electrical Systems for Military Ground Vehicles“ sowie die MIL-STD 704 „Aircraft Electric Power Characteristics“.

7.1.2 Systemabgrenzung

Der Übergang von einem DC-System zu einem anderen Netz oder einer anderen Netzebene kann über DC/DC- und DC/AC-Wandler erfolgen.

7.1.2.1 DC/DC (intern)

DC-DC-Wandler-Systeme sind in der Normung gut beschrieben. Für die Niederspannungsebene eignet sich vor allem folgende Norm:

- DIN EN 61204-6 (VDE 0557-6): Low-voltage power supplies, DC output – Part 6: Requirements for low-voltage power supplies of assessed performance (IEC 61204-6:2000); German version EN 61204-6:2001

Obwohl Nennspannungen und Spannungsbänder in den Normen DIN EN 60038 (VDE 0175-1) „IEC Standard Voltages“ und EN 300 132-3-1 V2.1.1, 2012 festgelegt sind, ist zu diskutieren, ob hier eine weitere Fokussierung auf weniger Spannungsbänder erfolgen sollte, um einen Entwicklungsfokus zu definieren. Die IEC SEG 4 hat zwei Vorzugsspannungen festgelegt (siehe Kapitel 7.2).

7.1.2.2 DC/AC bzw. AC/DC

Für die Wandlung von DC nach AC oder umgekehrt sind zwei Gruppen von Normen relevant:

Produktnormen:

- DIN EN 60146 (VDE 0558-X) Halbleiter-Stromrichter,
- DIN EN 62477 (VDE 0558-477) Sicherheitsanforderungen an Leistungshalbleiter-Umrichtersysteme,
- DIN EN 61800 (VDE 0160-10X) Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe,
- DIN EN 60950 (VDE 0805) Einrichtung der Informationstechnik – Sicherheit.

Elektrische Sicherheitsnormen:

- DIN EN 60664 (VDE 0110) Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen,
- DIN VDE 0100-200 (VDE 0100-200) Errichten von Niederspannungsanlagen – Begriffe,
- DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410) Errichten von Niederspannungsanlagen – Schutz gegen elektrischen Schlag,
- DIN VDE 0100-520 (VDE 0100-520) Errichten von Niederspannungsanlagen – Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Kabel- und Leitungsanlagen,
- DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530) Errichten von Niederspannungsanlagen – Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Schalt- und Steuergeräte.

7.1.2.3 Schnittstellen zu Lasten, Speichern, Quellen

Um die Verantwortlichkeiten zwischen den diversen DC-Netz-Teilnehmern abgrenzen zu können, sind klare Schnittstellen-/Übergabepunkt-Definitionen erforderlich.

Teilnehmer können sein:

- Erzeugungs-, Transport-, Verteilnetze:
 - ÜNB (Übertragungsnetzbetreiber),
 - VNB (Verteilnetzbetreiber),
 - „Erzeuger“,
 - „Einspeiser“,
 - „Netznutzer“,
 - „Netz-Anschlussnutzer“,
- Industrienetze:
 - Infrastrukturbetreiber für Industrie,
 - Infrastrukturbetreiber für IKT => Schnittstellen zur IKT z. B. definiert in ETSI EN 300123-2,
 - IKT-Betreiber (Netzprovider),
- Gewerbe,
- Haushalte.

7.1.3 Netz und Erdungssysteme

Die üblichen in DIN VDE 0100-100 (VDE 0100-100) und DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410) ausführlich beschriebenen Erdungssysteme (TT, TN, IT) können für DC-Netze angewendet werden.

Anforderungen für Erdungsanlagen, Schutzleiter, Schutzpotentialausgleichsleiter sind in DIN VDE 0100-540 (VDE 0100-540) ausreichend auch für DC-Netze festgelegt.

7.2 Spannungsebenen (-klassen)

DIN EN 60038 (VDE 0175-1):2012-04 „CENELEC-Normspannungen“ gilt u. a. für Gleichstrom-Bahnnetze (Tabelle 2 in der Norm) und Gleichstrom-Betriebsmittel mit Nennspannungen unter DC 750 V (Tabelle 6 in der Norm).

Bei IEC wurden in der damaligen „Systems Evaluation Group – Low Voltage Direct Current Applications, Distribution and Safety for use in Developed and Developing Economies“ (IEC/SEG 4) zwei bevorzugte Spannungsebenen definiert: 48 V und 380 V, einmal für niedrige und einmal für höhere Leistungsbereiche. Diese Festlegung soll nicht im Widerspruch, sondern ergänzend zu den unterschiedlichen Arbeiten in den Technischen Komitees gelten.

ANWENDUNG	SPANNUNG (DC) /V	NORM
PKW	12	DIN EN 60038 (VDE 0175-1)
LKW, Busse	24	DIN EN 60038 (VDE 0175-1)
PKW, LKW, E-light vehicle; mild Hybrid	48	DIN IEC/TS 61851-3 LEV, ISO 6469-3
ELV (SELV, PELV) Grenze	120	DIN EN 61140 (VDE 0140-1)
Zentrale Notstromversorgung	220	DIN EN 50171, DIN EN 50272
Telekommunikation	48	ETSI EN 300 132-3-1 V2.1.1 (2012)
	60	ETSI EN 300 132-2 Annex A
	354, 380	
Elektrofahrzeuge (60-800 V)	400	ISO 6469-3, ISO/PAS 19295, DIN EN 60038
Trolley Busse	600	EN 50163
Straßenbahn	600, 750	EN 50163
Industrielle Stromrichter	300-1200	EN 61800-5-1
PV	1500	DIN EN 60038 , IEC 61727

Tabelle 11 – Beispiele für Normen, Anwendungen und verwendete Spannungen

7.3 LVDC-Erzeugung am Beispiel der Photovoltaik

Bei der Auswahl und der Auslegung von SPDs für Gleichstromanlagen sind neben den in den Kapiteln 5.4 „Schutz bei Überspannung“ und 6.7 „Blitz- und Überspannungsschutz“ beschriebenen Blitzschutzanforderungen eine Reihe von DC-spezifischen Systemanforderungen zu berücksichtigen. Der für alle Gleichstromanwendungen wichtigste Unterschied ist der im Gegensatz zum Wechselstrom nicht vorhandene natürliche Strom- und Spannungsnulldurchgang. Daher sind Schaltvorgänge bei DC deutlich kritischer zu bewerten als bei AC. Es besteht ein deutlich höheres Risiko, dass ein stehender DC-Lichtbogen auftritt. Aufgrund unterschiedlicher Schaltbedingungen in Gleichstromkreisen gibt die DIN EN 60947-3 (VDE 0660-107) für Gleichstromschaltgeräte Gebrauchskategorien vor, die durch entsprechende Zeitkonstanten beschrieben werden (siehe Tabelle 12).

GEBRAUCHS- KATEGORIE	EINSCHALTEN			AUSSCHALTEN			TYPISCHE ANWENDUNGEN
	I/I_e	U/U_e	L/R [ms]	I_c/I_e	U_r/U_e	L/R [ms]	
DC-20	X	X	X	X	X	X	Schließen und Öffnen ohne Last
DC-21	1,5	01.05	1	1,5	01.05	1	Schalten von ohmscher Last einschließlich geringer Überlast
DC-22	4		2,5	4		2,5	Schalten von gemischter ohmscher und induktiver Last einschließlich geringer Überlast (z. B. Nebenschlussmotoren)
DC-23	4		15	4		15	Schalten von hochinduktiver Last (z. B. Reihenschlussmotoren)

Tabelle 12 – DC-Schaltkategorien nach DIN EN 60947-3

Verschiedene Gleichstromsysteme weisen, wie Abbildung 11 zeigt, eine unterschiedliche Quellencharakteristik auf. So zeigt eine konventionelle Gleichstromquelle ein lineares Verhalten zwischen Leerlauf und Kurzschluss. Ein PV-Generator wirkt hingegen nahezu wie eine Konstantstromquelle. Die besondere Quellencharakteristik ist auch bei DC-Anwendungen zu beachten, die Batterien oder Akkumulatoren als Energiespeicher verwenden.

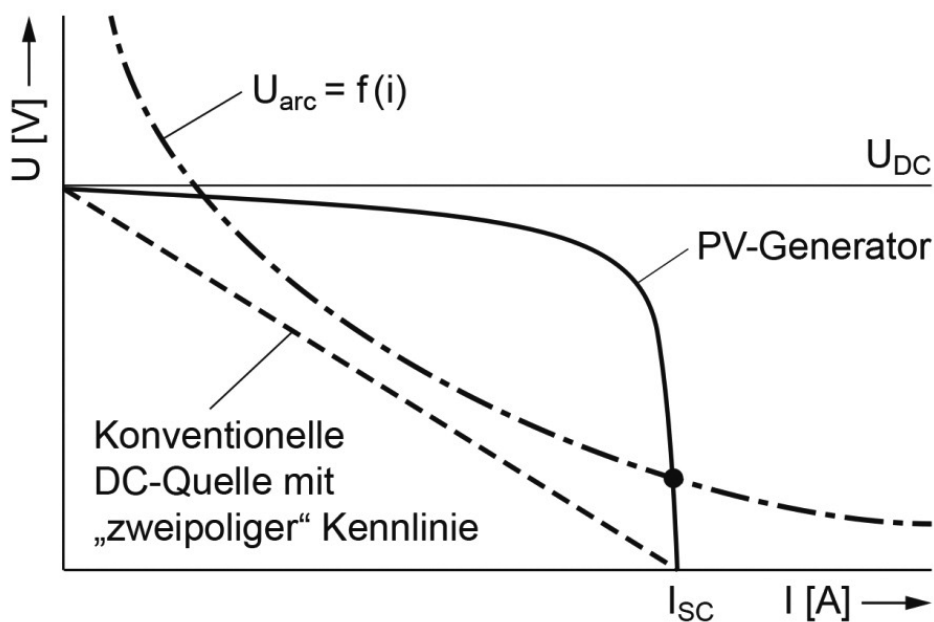


Abbildung 11 – PV-Quelle und konventionelle DC-Quelle [19]

Wie bei AC-Anlagen sind auch für SPDs in DC-Anwendungen die maximale Leerlaufspannung und der am Einbauort der SPD mögliche minimale und maximale Kurzschlussstrom wichtige Parameter. Viele SPDs enthalten als Schutzelement Varistoren, also spannungsabhängige Widerstände. Bei Leerlaufspannung ist deshalb auch die Restwelligkeit, also das Verhältnis des Mittelwertes zum maximalen Spannungswert, zu beachten. Die Restwelligkeit ist abhängig von der Art der Gleichspannungsquelle. PV-Generatoren liefern z. B. theoretisch eine ideale Gleichspannung, weisen also keine Restwelligkeit auf. Gleichstromquellen, die aus Brückenschaltungen gespeist werden, weisen hingegen, abhängig von der Art der Brückenschaltung und möglichen zusätzlichen Glättungskapazitäten, unterschiedlich hohe Restwelligkeiten auf. Abbildung zeigt die DC-Spannung einer B6-Schaltung und den arithmetischen Gleichspannungswert. Die Angabe eines DC-Mittelwertes ist also für die Beschreibung der Leerlaufspannung nicht ausreichend. Auch die maximal auftretende Spitzenspannung ist zu definieren.

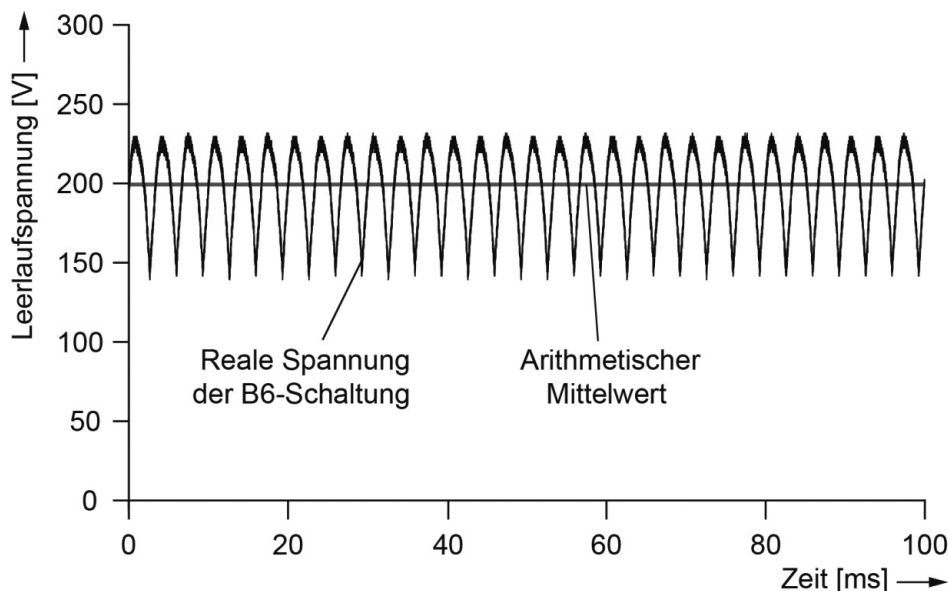


Abbildung 12 – Reale Spannung und Mittelwert bei B6-Schaltung [19]

Die „Merkmale der Spannung“ in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen sind in DIN EN 50160 festgelegt. Die bisherige Ausgabe der DIN EN 50160 gilt ausschließlich für die Merkmale der Versorgungsspannung an der Übergabestelle zum Netznutzer in öffentlichen Nieder-, Mittel- und Hochspannungs-Versorgungsnetzen unter normalen Betriebsbedingungen.

Analog zur bestehenden DIN EN 50160 müssen auch für Gleichspannungsversorgungsnetze die „Merkmale der Spannung“ festgelegt werden. Hierbei ist zu beachten, dass DC-Verbraucher mit gesteuerter Leistungselektronischer Eingangsschaltung häufig impulsförmige Lastströme aus Gleichspannungsversorgungsnetzen beziehen. Durch impulsförmige, zyklisch auftretende Lastströme kann es zu Spannungsschwankungen in Gleichspannungsversorgungsnetzen kommen, deren Momentanfrequenz (Restwelligkeit) erheblich höher als die Frequenz der z. B. durch B6-Brückengleichrichterschaltungen hervorgerufenen Spannungsschwankungen ist. Durch hochfrequente Schwankungen der versorgenden Spannung (Restwelligkeit) kann es zu unerwünschten Leckströmen in SPDs kommen. Um unerwünschte hochfrequente Leckströme in spannungsbegrenzenden Komponenten in den Eingangsschaltungen elektrischer Betriebsmittel und auch in SPDs

zu vermeiden, müssen für Gleichspannungsversorgungsnetze Festlegungen für max. Restwelligkeiten – in Abhängigkeit der Momentanfrequenz der Restwelligkeit – getroffen werden.

Bei batteriegespeisten DC-Quellen, wie sie zum Beispiel für Notstromversorgungen eingesetzt werden, ist darüber hinaus zu beachten, dass die Starkladespannung deutlich über der nominalen Systemspannung liegen kann. In solchen DC-Systemen können, abhängig vom Innenwiderstand des eingesetzten Akkumulators und der externen Beschaltung auch vergleichsweise hohe prospektive Kurzschlussströme auftreten.

7.4 Sonstige Betriebsmittel und Komponenten

Verschiedene Betriebsmittel und Komponenten können sowohl an 230 V AC oder auch an 220 V DC (mit entsprechenden Toleranzbändern) betrieben werden, wenn dies in dem Produkt-Datenblatt dokumentiert ist. 220 V DC ist eine Nennspannung für DC-Notstromversorgungssysteme und Sicherheitsstromversorgung, basierend auf 18 in Serie verschalteten 12 V-Batterien. Wenn in 230 V-Wechselspannungsnetzen aufgrund eines Fehlers die Wechselspannung ein Toleranzband verlässt, können ausgewählte Lasten wie z. B. Notbeleuchtung automatisch vom Wechselstromnetz auf ein 220 V DC-Inselnetz umgeschaltet werden. Solche DC-Notstromversorgungen können sich auf einen Gebäudeteil beschränken, z. B. einen Flur, oder sich über ein ganzes Gebäude ausdehnen. Die Entscheidung hierüber ist beeinflusst durch die Nennleistung und die Dauer einer Notstromversorgung sowie die Anzahl von Gebäudebrandabschnitten, die nur mit speziellen, E30-spezifizierten Stromkabeln überbrückt werden dürfen [44] [45].

Typische Anwendungen von 220 V DC-Notstromsystemen und Sicherheitsstromversorgungen sind Beleuchtungssysteme, Produktions- und EDV-Anlagen. Verschiedene Standards adressieren Spezifikationen von Beleuchtungssystemen für den umschaltbaren Betrieb mit 230 V AC und 220 V DC [67] [68] [46] [47] [48].

In der Regel enthalten diese Produkte am Stromversorgungseingang einen Netzfilter, Gleichrichter und ein spezielles Schaltnetzteil (PFC; en: Power Factor Correction). Damit diese Stromversorgung sowohl an 230 V AC als auch an 220 V DC betrieben werden kann, muss der Hersteller dies z. B. in der Auslegung der Regelkreise dieses Schaltnetzteils berücksichtigen.

Auch bei der Auswahl von Bauteilen muss dieser kombinierte Betrieb berücksichtigt werden. Stromversorgung mit Thyristor oder Triac Halbleiterbauelementen, wie sie bei einfachen Motorsteuerungen z. B. in Waschmaschinen verwendet werden, sind nicht für den Betrieb an einer DC-Versorgungsspannung geeignet.

Zudem ist zu beachten, dass Geräte mit Schaltkontakten, ein deutlich reduziertes Schaltvermögen aufweisen, da diese in der Regel nicht für DC ausgelegt sind.

7.4.1 Kabel und Leitungen

Dieses Thema wird weitestgehend in der DIN VDE 0298-3 (VDE 0298-3) und DIN EN 50565-1 (VDE 0298-565-1) beschrieben. Das Errichten von Kabel- und Leitungsanlagen wird in DIN VDE 0100-520 (VDE 0100-520) Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 5-52 „Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Kabel- und Leitungsanlagen“ behandelt.

Die AC- und DC-Stromkreise müssen in Kabeln und Leitungen getrennt verlegt sein. Das ist heute bei Netzstromkreisen und Busanwendung ebenfalls Standard. Die Fragestellung ist, ob die Leitungen von einem AC-Netz und das des DC-Netzes sich äußerlich farblich unterscheiden müssen. Eine Verlegung in getrennten Leitungen ermöglicht einen separaten Schutz der beiden Spannungsverteilungssysteme. Zu untersuchen ist der Fehlerfall, bei dem ein AC- und ein DC-System galvanisch verbunden werden.

Bei den Kabeln und Leitungen gibt es bereits Produkte am Markt, welche sich – im Vergleich zu gängigen Wechselstromkabeln – durch eine höhere Spannungsfestigkeit zwischen L+ und L- oder zwischen L und E/M unterscheiden. (600 V AC im Vergleich zu 1 000 V DC).

Bezüglich der Außenmantelfarbe sollte bei Installationen zur deutlichen Unterscheidung eine farbliche oder andere Differenzierung zu anderen Kabeln und Leitungen erfolgen.



Nennspannung

Die Nennspannung einer isolierten Starkstromleitung ist die Spannung, auf die der Aufbau und die Prüfung der Leitung hinsichtlich der elektrischen Eigenschaften bezogen werden. Die Nennspannung wird durch Angaben von zwei Wechselspannungswerten U_0/U in V ausgedrückt.

U_0 Effektivwert zwischen einem Außenleiter und „Erde“ (nicht isolierende Umgebung),

U Effektivwert zwischen 2 Außenleitern, einer mehradrigen Leitung oder eines Systems von einadrigen Leitungen.

In einem System mit Wechselspannung muss die Nennspannung einer Leitung mindestens gleich der Nennspannung des Systems sein, für die sie eingesetzt wird. Diese Bedingung gilt sowohl für den Wert U_0 als auch für den Wert U . In einem System mit Gleichspannung darf dessen Nennspannung höchstens das 1,5-fache des Wertes der Nennspannung (Wechselspannung) der Leitung betragen.

Die Betriebsspannung eines Systems darf die Nennspannung des Systems dauernd überschreiten. Die höchstzulässige dauerhafte Betriebsspannung der Leitung ist in Tabelle 13 aufgeführt. Die Spannungswerte für den Gleichstrom werden aus den Werten für Wechselstrom hergeleitet.

NENNSPANNUNG DER LEITUNG	HÖCHSTZULÄSSIGE DAUERHAFTES BETRIEBSSPANNUNG DER LEITUNG			
	Wechselstrom	Drehstrom	Gleichstrom	
U_0/U	Leiter – Erde	Leiter – Leiter	Leiter – Erde	Leiter – Leiter
300/300 V	320 V	320 V	410 V	410 V
300/500 V	320 V	550 V	410 V	820 V
450/750 V	480 V	825 V	620 V	1,24 kV
0,6/1 kV	700 V	1,2 kV	0,9 kV	1,8 kV

Tabelle 13 – Höchstzulässige Spannungen zur Nennspannung einer Leitung

Bündeln von Leitungen (Auszüge DIN EN 50343 (VDE 0115-130))

Wenn mehrere Leitungen als Bündel zusammen zu verlegen sind, sollten mindestens die folgenden Anforderungen berücksichtigt werden:

- wärmespezifische Anforderungen,
- EMV-Anforderungen,
- unterschiedliche Nennspannungen,
- mechanische Aspekte wie Festigkeit und Gewicht des Bündels und verfügbarer Einbauraum,
- wenn verschiedene Leitungsquerschnitte gebündelt werden, sollten die mechanischen Beanspruchungen berücksichtigt werden.

Trennung von Leitungen verschiedener Nennspannungen aus Sicherheitsgründen

Leitungen unterschiedlicher Nennspannung müssen in größtmöglichem Umfang voneinander getrennt verlegt werden.

Die Trennung muss entweder durch Abstand oder durch isolierende oder geerdete metallische Trennwände erfolgen (siehe Abbildung 14). Hierbei muss darauf geachtet werden, dass die isolierenden Trennwände für die max. zu erwartenden Kurzschlussfestigkeit ausgelegt sind.

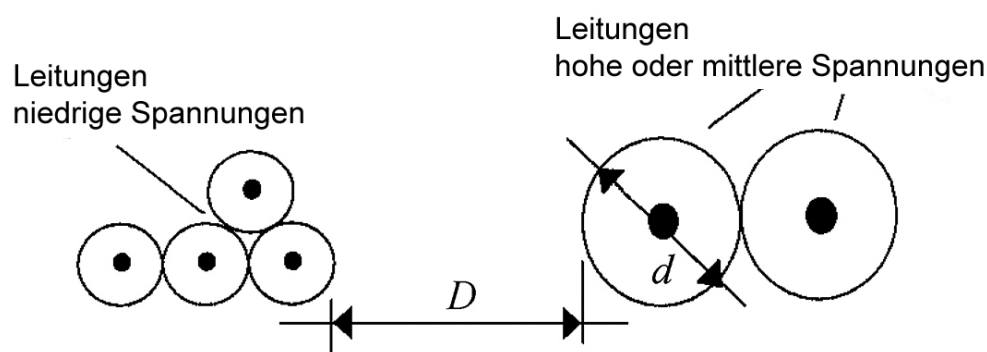


Abbildung 13 – Trennung der Leitungen durch Abstand: $D > 2d$ und $D > 0,1 \text{ m}$ [27]

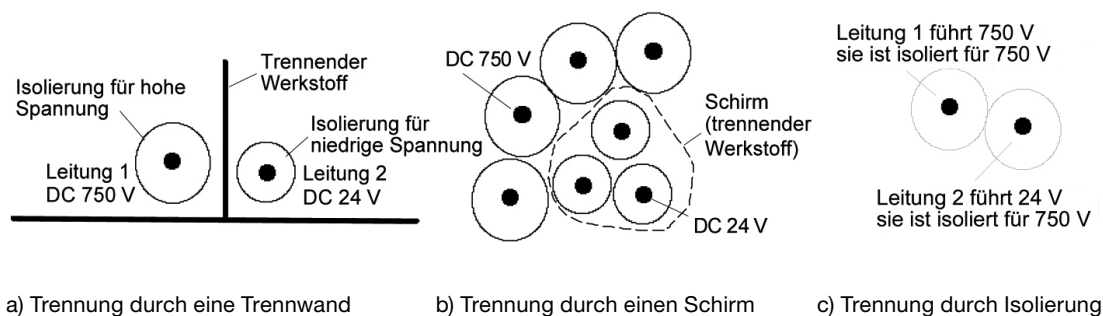


Abbildung 14 – Beispiele der Trennung von Leitungen durch trennendes Material oder durch Isolierung [27]

7.4.2 Kompatibilität der Geräte für AC/DC testen und dokumentieren

Um Produkte für AC- und DC-Versorgungsspannungen spezifizieren zu können, sollten geeignete Normen und Prüfvorgänge in Produktstandards definiert werden. Beispiele hierfür sind [47] [48].

8.1 Verweis Smart-Grid

Die Energiewende erzwingt einen Wandel des Energieversorgungsnetzes hin zu einem intelligenten und dezentralen Energieversorgungsnetz – Smart-Grid. Fluktuationen in der Erzeugung, hervorgerufen durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien im Stromnetz, erhöhen den Regelaufwand um Erzeugung dem Verbrauch auszugleichen. Besonderer Regelbedarf besteht in der Verteilnetzebene, in der ein Großteil der erneuerbaren Energien angebunden ist. Für die Regelung und Koordination des Energieflusses in einem DC- wie auch AC-Verteilnetz ist eine Kommunikations-Infrastruktur erforderlich.

Die erforderliche Struktur des Smart-Grids ist im Rahmen der CEN-CENELEC-ETSI-Smart-Grid-Coordination-Group eine Smart-Grid-Reference-Architecture erarbeitet worden. Anhand des Smart-Grids-Architecture-Model (SGAM) lassen sich die erforderlichen Kommunikationswege, Erzeugereinheiten und Übertragungswege sowie die Geschäftsmodelle abbilden.

Die IEC Strategic Group on Smart-Grid (IEC SG3) befasst sich bereits seit 2008 mit der Erstellung von Standards und Normen für das Smart-Grid. Die DKE hat in ihrer Normungs-Roadmap E-Energy/Smart-Grids 1.0 und 2.0 Trends und Perspektiven der Smart-Grid-Normung zusammengefasst und nennt dort folgende Standards als Kernstandards für Kommunikation im Smart-Grid [28] [29] [30]:

- IEC/TR 62357-1 „Power systems management and associated information exchange – Part 1: Reference architecture“,
- DIN EN 61970-1 „Schnittstelle der Anwendungsprotokolle von Energieverwaltungssystemen (EMS-API)“,
- DIN EN 61968-X „Integration von Anwendungen in Anlagen der Elektrizitätsversorgung – Systemschnittstellen für Netzführung“,
- DIN EN 61850-X „Kommunikationsnetze und -systeme für die Automatisierung in der elektrischen Energieversorgung“,
- DIN EN 62351-X „Datenmodelle, Schnittstellen und Informationsaustausch für Planung und Betrieb von Energieversorgungsunternehmen – Daten- und Kommunikationssicherheit“.

Weitere Normungsaktivitäten sind unter folgenden Links zu finden:

<http://www.iec.ch/smartgrid/standards/>

<http://smartgridstandardsmap.com/>

http://www.iec.ch/smartgrid/downloads/sg3_roadmap.pdf

8.2 Regelungskonzepte (Lastflussmanagement, Energiemanagement)

Je nach Anwendungsgebiet existieren unterschiedliche Anforderungen im Hinblick auf das Spannungsniveau und die Spannungsqualität. Je nach Ausführung des Gleichspannungsnetzes kann die Speisung des Netzes aus einem oder aus mehreren Umrichtern erfolgen. Angestrebt ist, dass die eingespeiste Leistung sich entsprechend der Nennleistung des jeweiligen Umrichters aufteilt. Dadurch kann eine gleiche Ausnutzung der Umrichter realisiert werden. Zur Spannungsregelung sind verschiedene Strategien denkbar.

Zur Anwendung kommt z. B. das DC-Voltage-Droop-Verfahren, sobald mehrere Einspeisepunkte vorhanden

sind. Die Regelung des jeweiligen Umrichters muss in der Lage sein, zum einen die Spannung am Ausgang zu regeln und zum anderen eine gewünschte Strom/Spannungs-Ausgangscharakteristik bereitzustellen. Zudem besteht die Forderung, dass jeder Umrichter im Falle des Ausfalles der Kommunikation autark arbeiten muss, wobei eine netzstützende Funktion des speisenden Umrichters gewährleistet werden muss.

Ergänzend kann eine Überlast in einem Versorgungszweig durch den Umrichter erkannt und entsprechend einer vorgegebenen Charakteristik begrenzt werden.

Das zumeist verwendete Droop-Control-Regelungsverfahren zur Stellung der Ausgangsspannung der speisenden Umrichter stellt eine Einspeisespannung zur Verfügung, die mit steigender Einspeiseleistung leicht reduziert wird. Dadurch wird anderen Einspeisequellen die Möglichkeit gegeben, an der Lastspeisung beteiligt zu werden.

Auf der Leistungsebene muss für die virtuelle Impedanz die Möglichkeit einer steuer- und regelbaren Einspeisespannung gegeben sein. Die überlagerte Kontroll-Architektur, die für die Gesamtregelung des Netzes verantwortlich ist, kann ausschließlich dezentral (en: decentralized control) oder mit langsamer Kommunikation (en: distributed control) oder schneller Kommunikation und zentraler Steuerung (en: centralized control) erfolgen.

Bestehende Normen in diesem Bereich umfassen [31]

- IEC/TR 62357-1 „Power systems management and associated information exchange – Part 1: Reference architecture“,
- DIN EN 61970-1 „Schnittstelle der Anwendungsprotokolle von Energieverwaltungssystemen (EMS-API)“,
- DIN EN 61968-X „Integration von Anwendungen in Anlagen der Elektrizitätsversorgung – Systemschnittstellen für Netzführung“,
- DIN EN 61850-X „Kommunikationsnetze und -systeme für die Automatisierung in der elektrischen Energieversorgung“,
- DIN EN 62351-X „Datenmodelle, Schnittstellen und Informationsaustausch für Planung und Betrieb von Energieversorgungsunternehmen – Daten- und Kommunikationssicherheit“,
- DIN EN 62056-X (VDE 0418-X) „Datenkommunikation der elektrischen Energiemessung – DLMS/COSEM“,
- DIN EN 61508-X (VDE 0803-X) „Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme“.

8.3 Systemrelevante Kommunikation

Der Kommunikationsumfang im AC-Smart-Grid ist umfänglicher im Vergleich zu einem einfachen Wechselspannungsnetz. In einer Smart-Grid-Struktur mit eingebundener regenerativen Energieerzeugung und lokalen Speichern müssen neben den Steuersignalen zur Steuerung des Netzes noch zusätzlich die Informationen über die Zustände der Energiespeicher und Erzeuger zu einer zentralen Regelplattform kommuniziert werden. Insgesamt wird der Kommunikationsbedarf größer, wobei ein höherer Kommunikationsbedarf und ein erweiterter Kommunikationsumfang in den unteren Spannungsebenen erforderlich sind.

In einem DC-Netz mit eingebundenen regenerativen Energiequellen und Speichern ist, je nach Ausbau, ebenfalls eine Kommunikationsinfrastruktur erforderlich. Die Anforderungen an das DC-Netz hinsichtlich Spannungsqualität und Energieflussregelung bestimmen nicht nur den Aufwand einer Regelung eines Netzbereiches, sondern auch, wie bei einem Wechselspannungsnetz, den Aufwand an Messstellen zur Erfassung des Zustandes der Energieeinspeisungen und -speicherung. Eine jeweils für den betreffenden Anwendungsfall

zu implementierende Regelungsplattform bedingt sich hinsichtlich der Größe und der Komplexität nur dem Anwendungsfall, nicht aber hinsichtlich der Netzform – also Wechsel- oder Gleichstromnetz. Geringe Unterschiede in den Sensoren sind jedoch gegeben. Aufgrund der beschriebenen Tatsache können die lokalen Energie- und Gebäudemanagement-Regelungsplattformen nebst ihrer normativen Funktionsbeschreibung weiter zur Anwendung kommen, jedoch sind einige Sensoren anzupassen. Dies gilt auch für ein Smart-Meter-Gateway, das derzeit nur für Wechselspannungsnetze erhältlich ist. Flankierend hierzu sind für Deutschland die regulatorischen Vorgaben mit zu betrachten, welche sich aus dem Energiewirtschaftsgesetz, dem Schutzprofil für ein Smart-Meter-Gateway (BSI-CC-PP-0073) und den technischen Richtlinien (BSI TR-03109) hinsichtlich der Schaltzugriffe auf Erzeugungsanlagen, ggf. Speicher und steuerbare Verbrauchseinrichtungen durch den Netzbetreiber ableiten.



Bevor die systemrelevante Kommunikation für DC-Verteilnetze normiert werden kann müssen folgende Punkte geklärt werden:

- Regelstrategie im DC-Verteilnetz,
- Kommunikationsbedarf zur Umsetzung der Regelstrategie,
- Funktionale Sicherheit nach DIN EN 61508/DIN EN 61511 (VDE 0810).

8.4 Weiterführender Kommunikationsbedarf und Möglichkeiten

Die Ausführung einer Regelungskommunikationsstruktur eines AC- und eines DC-Netzes sind nahezu identisch, Unterschiede sind in den Größen der Parameter zur Beschreibung der Dynamik zu erwarten. Im Rahmen der allgemeinen Digitalisierung und des Smart-Grids ist das Vorsehen einer geeigneten Kommunikationsstruktur für DC-Netze im Normierungsprozess empfehlenswert. Anwendungen wie Haus-/Gebäudeautomatisierung, Direktvermarktung und Smart Metering stellen weitere Anforderungen an die Kommunikationsinfrastruktur und sollten im Rahmen der Normierung im Kommunikationskonzept Verteilnetze berücksichtigt werden. Eingänglich ist der Bedarf an zusätzlichen Normen zu ermitteln, welche speziell den Anwendungsbereich des Smart-Grids behandeln.



9.1 Beleuchtungssysteme

9.1.1 Einleitung

Dieses Kapitel bietet eine Übersicht zu Beleuchtungssystemen, die verschiedene Niederspannungsgleichstromsysteme nutzen sowie deren technische Standards. Für eine DC-Versorgung von Beleuchtungssystemen sprechen die höhere Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der DC-Stromversorgung in Kombination mit Batteriespeichern, eine höhere Leistungsfähigkeit von Kabeln bei DC-Betrieb, die gleichzeitige Übertragung elektrischer Leistung und digitaler Steuerungsdaten in einem Kabel z. B. mit PoE sowie die direkte Nutzung von Gleichstrom aus Solarstromanlagen mit weniger Umwandlungsverlusten [69].

Der generelle Weg zu verpflichtenden Standards für DC-Systeme in Europa führt über die „Richtlinie zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten betreffend elektrische Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen“ [32]. Diese Richtlinie adressiert Anwendungen mit Nennspannungen zwischen 50 und 1 000 V Wechsel- und Drehspannung sowie zwischen 75 V und 1 500 V Gleichspannung.

9.1.2 Beleuchtungssysteme mit DC-Schutzkleinspannungen

Beleuchtung und 5 V-USB

Mit Solarstrom aufgeladene Batterien bieten Menschen ohne Anschluss an ein Stromnetz die einzige Möglichkeit Elektrizität zu beziehen. Hauptanwendungen solcher Solar-Home-Systeme sind die Beleuchtung und das Aufladen von Mobiltelefonen, wie in Abbildung 15 und Abbildung 16 dargestellt. Die LED-Lampen in diesen Bildern nutzen das 5 V USB Interface um Elektrizität an externe Geräte zu übertragen [33]. Solche Produkte bieten Menschen Zugang zu neuen Technologien, wie es die UN-Millennium-Ziele im Kapitel 8F beschreiben [34]. Das USB-Implementer-Forum hat hierzu die Standards entwickelt [35].



Abbildung 15 – Philips LifeLight Plus [36]



Abbildung 16 – Philips LifeLight Home [36]

Beleuchtungssysteme mit 12 V DC

12 V AC- und DC-Versorgungsspannungen sind ursprünglich in Kraftfahrzeugen und Gebäuden unter anderem für Niedervolt-Halogenlampen eingeführt worden. Heute werden diese Spannungen auch für die energieeffizientere LED-Beleuchtung verwendet. Spezifikationen der Hersteller definieren dabei den anwendbaren AC- beziehungsweise DC-Spannungsbereich [37].

Häufig werden Batterien mit üblicherweise 12 V-Nennspannung in mit Solarstrom gespeisten Straßenlampen verwendet. Diese Leuchten bringen Licht und Sicherheit in Gebiete ohne reguläre Stromnetze [38]. Eine batteriegepufferte Solarstromversorgung ermöglicht an vielen Orten eine nachhaltige und wartungsarme LED-Beleuchtung mit geringeren Investitionen gegenüber der Verlegung von neuen Stromnetzen, wenn diese ausschließlich für eine öffentliche Beleuchtung verwendet würden.

Beleuchtungssysteme mit 24 V DC

Die Partner der EMerge Alliance haben zwei Standards für 24 V DC und 380 V DC Stromversorgungen entwickelt. Der 24 V-DC-Standard für „Occupied Spaces“ berücksichtigt die limitierte Spannung und Leistung des „US National Electric Code (NEC)“ für extra sichere Schutzkleinspannungen in den USA [39] [40]. Auf den Internetseiten der EMerge Alliance sind verschiedene Beleuchtungsprodukte dokumentiert, die den „Occupied Space“-Standard erfüllen [41]. Diese Produkte ermöglichen es z. B. in Bürogebäuden Beleuchtungssysteme in abgehängten Decken sehr einfach, schnell und sicher zu montieren.

Beleuchtungssysteme mit 48 V DC-PoE

Elektrische Geräte mit einer Leistungsaufnahme von bis zu 100 W und separaten digitalen Kommunikationsschnittstellen können kostengünstiger mit der PoE-Technologie installiert und in Betrieb genommen werden, als mit Datenleitungen und separaten Stromkabeln, die zudem häufig von Hand konfektioniert werden. Auch eine personalisierte Licht- und Gebäudeklimasteuerung über Smartphones kann mit PoE ermöglicht werden.

Firmen und Partner der IEEE-Standardisierungsprojektgruppe IEEE 802 haben für PoE-Systeme technische Standards entwickelt und erweitern diese derzeit. Beispiele für diese Standards sind IEEE 802.3af, IEEE 802.3at und IEEE 802.3bt [42] [43].

9.1.3 Beleuchtungssysteme mit DC-Niederspannung

DC-Niederspannungsnetze im Bereich von 120 V bis 1 500 V haben zwei wesentliche Vorteile gegenüber der Verwendung von AC-Niederspannungssystemen von zum Beispiel 230 V oder 400 V. Erstens ermöglichen batteriegepufferte Gleichspannungen eine hochverfügbare Stromversorgungsart, die daher in einsatzkritischen Anwendungen bevorzugt verwendet werden. Zweitens werden DC-Versorgungsspannungen in vielen drehzahlgeregelten Antrieben verwendet. Im Bremsbetrieb können Antriebe elektrische Energie über gemeinsame DC-Netze viel einfacher an andere Antriebe oder Lasten übertragen werden. Beispiele hierfür sind DC-Netze von Bahnen und Industrieanlagen [70].

216 V DC ist eine Nennspannung für DC-Notstromversorgungssysteme basierend auf 18 in Serie verschalteten 12 V-Batterien. Wenn in 230 V-Wechselspannungsnetzen aufgrund eines Fehlers die Wechselspannung ein Toleranzband verlässt, können ausgewählte Lasten wie z. B. Notbeleuchtung automatisch vom Wechselstromnetz auf ein 216 V DC-Inselnetz umgeschaltet werden. Solche DC-Notstromversorgungen können sich

auf einen Gebäudeteil beschränken, zum Beispiel einen Flur, oder sich über ein ganzes Gebäude ausdehnen. Die Entscheidung hierüber ist beeinflusst durch die Nennleistung und die Dauer einer Notstromversorgung sowie die Anzahl von Gebäudebrandabschnitten, die nur mit speziellen, E30-spezifizierten Stromkabeln überbrückt werden dürfen [44] [45].

Typische Anwendungen von 220 V DC-Notstromsystemen sind Beleuchtungen, Industrielle Prozesssteuerungen und kleine IT-Serverinstallationen. Verschiedene IEC-Standards adressieren Spezifikationen von Beleuchtungssystemen für den umschaltbaren Betrieb mit 230 V AC und 220 V DC [46] [47] [48].

Beleuchtungssysteme mit 350 V DC/380 V DC

Rechenzentren und Telekommunikationsanlagen verwenden unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme mit höchster Zuverlässigkeit, deren Batteriespeicher Nennspannungen von 350 V DC oder 380 V DC aufweisen und deren Nennleistungen bis in den Megawattbereich gehen. Da Serverstromversorgungen auch intern einen 380 V DC-Bus nach dem Netzgleichrichter und dem Schaltnetzteil zur Leistungsfaktorkorrektur aufweisen, war es nur konsequent, eine 380 V DC-Stromversorgungsinfrastruktur zu entwickeln. ETSI hat einen Standard für dieses DC-Stromversorgungssystem publiziert [49] [50]. Durch den Wegfall von Wechselrichtern, 50 Hz-Transformatoren und Leistungsfaktorkorrekturschaltungen in 380 V DC-Systemen ist deren Wirkungsgrad um bis zu 10 % höher als bei herkömmlichen Rechenzentren mit Wechselspannungssystemen im Anschluss an zentrale USV-Anlagen [75].

Beleuchtungssysteme mit 700 V/760 V DC

Industrielle Niederspannungsinstallationen mit mehr als 2 000 W Nennleistung verwenden üblicherweise eine Energieversorgung aus einem 400 V-Drehstromsystem anstelle von 230 V-Wechselspannung. Ein Mehrphasensystem ist auch eine Option für ein z. B. 760 V-Gleichspannungssystem, das im Detail als ein bipolares ± 380 V DC-Netz realisiert wird. Lasten mit großer Leistung, zum Beispiel Antriebe, können mit 760 V DC versorgt werden. Kleine Lasten, zum Beispiel Computer, Industriesteuerungen sowie einzelne Leuchten, können in zwei Gruppen mit annähernd gleicher Leistung aufgeteilt und zu einer Hälfte aus +380 V und zur anderen Hälfte aus -380 V DC versorgt werden. Energie kann aus natürlichen DC-Quellen, wie z. B. PV-Anlagen, mit weniger Verlusten zu DC-Lasten übertragen werden, weil Umwandlungsverluste in Wechselrichtern, Transformatoren und Leistungsfaktorkorrekturschaltungen teilweise wegfallen [51]. Ein- und Mehrphasen-Wechselspannungs- als auch Gleichspannungssysteme sowie deren Erdungssysteme sind standardisiert [52].

Beleuchtungssysteme mit sehr hohen installierten Gesamtleistungen findet man z. B. in Gewächshäusern, für die bipolare DC-Netze von Interesse sind. Die Firma DirectCurrent BV hat eine Pilotinstallation in einem Gewächshaus realisiert, in dem 1 000 W-Lampen direkt mit 700 V DC versorgt werden [53].

9.1.4 EMC-Standards

Eine Gruppe von Standards aus dem Gebiet der EMV ist sehr wichtig, um robuste Produkte und Systeme zu realisieren. Interessanterweise sind diese EMV-Standards bereits so formuliert, dass diese sowohl für AC- als auch DC-Versorgungsspannungen angewendet werden können.

Die Norm DIN EN 61000-4-5 (VDE 0847-4-5) „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 4-5: Prüf- und Messverfahren – Prüfung der Störfestigkeit gegen Stoßspannungen“ definiert transiente Überspannungen

und deren Prüfeinrichtungen, die zu AC- oder DC-Versorgungsspannungen hinzugefügt werden, um die Immunität von Produkten gegenüber Störungen auf Versorgungsspannungen zu testen. Solche transienten Überspannungen treten bei Blitzeinschlägen auf oder wenn Ströme in Netzen mit Leitungsinduktivitäten schnell durch Sicherungen oder Leistungsschalter abgeschaltet werden.

Viele Stromversorgungen und auch Vorschaltgeräte für Beleuchtungssysteme werden heute als Schaltnetz-
teile aufgebaut. Damit verbunden ist der Nachteil, dass diese Geräte elektromagnetische Störungen sowohl
geleitet als auch abgestrahlt aussenden. Um diese in AC- oder DC-Netze abgegebenen Störungen inner-
halb bestimmter Frequenzbereiche zu begrenzen, sind mehrere Standards durch das „Comité International
Spécial des Perturbations Radioélectriques“ (CISPR) entwickelt worden. Diese Standards sind zudem in
EN-Normen übernommen worden.

- CISPR 11: „Industrial, scientific and medical equipment – Radio-frequency disturbance characteristics – Limits and methods of measurement“;
- CISPR 14-1: „Electromagnetic compatibility – Requirements for household appliances, electric tools and similar apparatus – Part 1: Emission“;
- CISPR 15: „Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment“;
- CISPR 22: „Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement“.

9.2 Inselsysteme (Micro-Grid)

Micro-Grids können sowohl als ausschließliche Inselnetze oder als Hybrid-Netze ausgelegt werden. Hybrid-
Netze können netzgekoppelt (en: grid-connected) oder abgekoppelt betrieben werden (en: island mode). Als
Energiezugangsnetze werden Inselnetze auch Mini-Grids oder Village-Grids genannt und dienen der Energie-
versorgung von entlegenen Siedlungsstrukturen oder wirtschaftlichen Standorten wie Minenanlagen.

Die Alliance for Rural Electrification hat in ihrer Studie von AC-Mini-Grids auf folgende Standards verwiesen [58]:

- BWEA „Small Wind turbine Performance and Safety Standards“,
- IEC/TS 62257-4 „Empfehlungen für kleine Anlagen mit erneuerbarer Energie und Hybridanlagen für die Elektrifizierung ländlicher Gebiete – Teil 4: Systemauswahl“,
- IEC/TS 62257-2 „Empfehlungen für kleine Stromerzeugungssysteme der erneuerbaren Energien und Hybridsysteme zur ländlichen Elektrifizierung – Teil 2: Elektrifizierungssysteme und Anforderungen“,
- DIN EN 61427 „Wiederaufladbare Zellen und Batterien für die Speicherung erneuerbarer Energien – Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren“,
- DIN EN 61215 (VDE 0126-31) „Terrestrische kristalline Silizium-Photovoltaik-(PV-)Module – Bauarteignung und Bauartzulassung“,
- DIN EN 61730 (VDE 0126-30) „Photovoltaik (PV-)Module – Sicherheitsqualifikation“,
- DIN EN 62124 (VDE 0126-20-1) „Photovoltaische (PV-)Inselsysteme – Bauarteignung und Typprüfung“,
- IEC/TS 62257-3 „Empfehlungen für kleine Anlagen mit erneuerbarer Energie und Hybridanlagen für die Elektrifizierung ländlicher Gebiete – Teil 3: Projektentwicklung und Projektmanagement“,
- IEC/TS 62257-5 „Empfehlungen für kleine Anlagen mit erneuerbarer Energie und Hybridanlagen für die Elektrifizierung ländlicher Gebiete – Teil 5: Schutz vor elektrischen Gefährdungen“,

- IEC/TS 62257-6 „Empfehlung für kleine Anlagen mit erneuerbarer Energie und Hybridanlagen für die Elektrifizierung ländlicher Gebiete – Teil 6: Abnahme, Betrieb, Wartung und Ersatz“.

Für den netzgekoppelten Betrieb ist folgende Publikation relevant für den AC-Bereich:

Greacen, C., R. Engel, and T. Quetchenbach. "A Guidebook on Grid Interconnection and Islanded Operation of Mini-Grid Power Systems up to 200 kW." Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013.

http://www.schatzlab.org/docs/A_Guidebook_for_Minigrids-SERC_LBNL_March_2013.pdf.

Die Übertragbarkeit der hier genannten Normen auf den DC-Bereich ist zu prüfen.



9.3 Energiezugangsnetze (Globaler Süden)

Im Bereich der Energiezugangsnetze (en: Energy access grids) gelten besondere Anforderungen an Kosten und Energieeffizienz. Die Kaufkraft der Kunden in Entwicklungsländern ist oft stark eingeschränkt, die bislang verbreiteten Energieträger (vornehmlich Kerosin und Wegwerfbatterien) sind allerdings auch sehr teuer.

Um Mindeststandards für die elektrische Energieversorgung im Entwicklungskontext zu vereinheitlichen, hat die Weltbank im ESMAP Programm Elektrifizierungsstufen (en: Electricity Access Tiers) definiert. Die Tabelle 14 stellt die wirtschaftliche Nutzung im Kleingewerbe dar.

			STUFE 0	STUFE 1	STUFE 2	STUFE 3	STUFE 4	STUFE 5
1. Kapazität	Elektrisch	Leistung		Min. 3 W	Min. 50 W	Min. 200 W	MIN. 800 W	MIN. 800 W
		Täglich bereitgestellte Energie		Min. 12 Wh	Min. 200 Wh	Min. 1,0 kWh	Min. 3,4 kWh	Min. 8,2 kWh
		Typische Quellen		Solarlampe	Solares Heimsystem	Generator oder Mini-Grid	Generator oder Grid	Grid
	Nicht elektrisch					Verfügbare nicht elektrische Energie erfüllt teilweise die Anforderungen	Verfügbare nicht elektrische Energie erfüllt zum größten Teil die Anforderungen	Verfügbare nicht elektrische Energie erfüllt alle Anforderungen
	Beides					Keine relevante Anwendung fehlt allein aufgrund von Energieversorgungsengpässe		
2. Dauer der täglichen Versorgung	Elektrisch			Min. 2 Std	Min. 4 Std	Min. 50 % der Betriebsdauer	Min. 75 % der Betriebsdauer	Min. 95 % Betriebsdauer
	Nicht elektrisch					Verfügbare nicht elektrische Energie erfüllt teilweise die Anforderungen	Verfügbare nicht elektrische Energie erfüllt zum größten Teil die Anforderungen	Verfügbare nicht elektrische Energie erfüllt alle Anforderungen
	Beides					Eine längere Betriebsdauer wird nicht allein durch Mangel an ausreichender Energie (Kapazität oder Dauer) verhindert		

Tabelle 14 – Elektrifizierungsstufen für die wirtschaftliche Nutzung im Kleingewerbe [55]

Derzeitige Beispiele von Elektrifizierungsnetzen sind fast ausschließlich im SELV-Bereich:

- 24 V DC-Netz devery (Tanzania)
<http://devery.com/>
- 24 V (48 V Indien)
<http://meragaopower.com/>

Allerdings gibt es auch Netze, welche diesen Bereich verlassen, mit teilweise sehr unklaren Bestimmungen zu Sicherheitsstandards (insbesondere Solid-State-Sicherungen):

- 230 V DC SOLAR_IC (Bangladesh)
<http://solar-ic.com/solaricdev/>

- 120-250 V DC Schneider Electric
<http://www.schneider-electric.com/products/in/en/8600-access-to-energy-collective-solutions/8610-villaya-collective-solutions/62210-dc-micro-grid/>

Andere Ansätze verfolgen einen modularen, Schritt-für-Schrittaufbau von Netzen, bei denen ausgehend von sogenannten Solar-Home-Systemen (10-100 Wp Solar Leistung, derzeit über 4 Millionen alleine in Bangladesch im Einsatz), zunehmend vernetzt werden, um dann als Micro-Grid mit oder ohne Netzanschluss zu operieren.

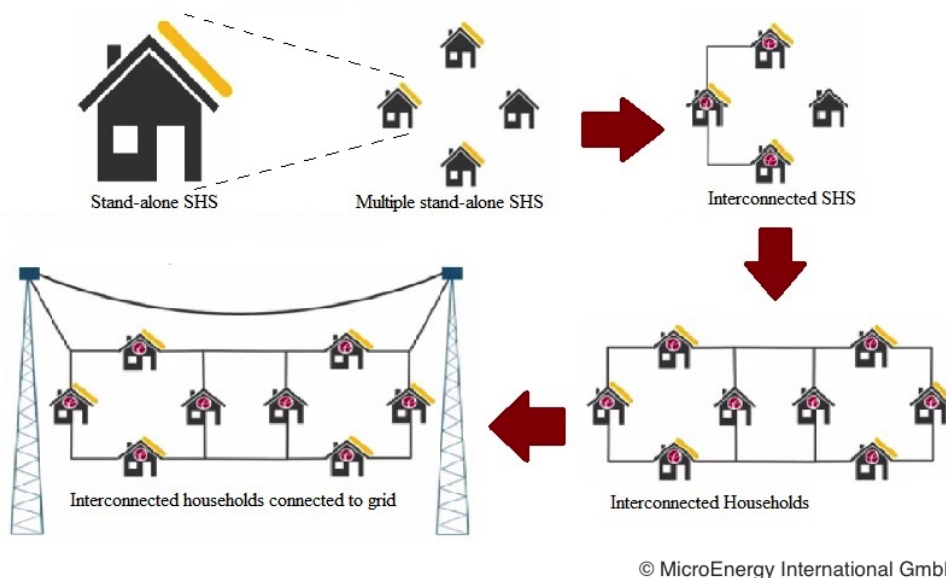


Abbildung 17 – Modulare Erweiterungen von DC-Energiezugangssystemen, Beispiel Swarm Electrification [56]

Wichtige bestehende Normen in diesem Bereich sind:

- DIN IEC 62053-41 (VDE 0418-3-41) „Gleichstrom-Elektrizitätszähler – Besondere Anforderungen – Teil 41: Elektronische Zähler für Gleichstrom“,
- DIN VDE 0418-3 (VDE 0418-3) „Bestimmungen für Elektrizitätszähler – Teil 3: Gleichstromzähler“,
- DIN EN 62040-4 (VDE 0558-540) „Unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme (USV) – Umweltaspekte“,
- DIN EN 61557-10 (VDE 0413-10) „Elektrische Sicherheit in Niederspannungsnetzen bis AC 1 000 V und DC 1 500 V – Geräte zum Prüfen, Messen oder Überwachen von Schutzmaßnahmen“,
- DIN EN 62040-1 (VDE 0558-510) „Unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme (USV) – Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Sicherheitsanforderungen an USV“,
- DIN IEC 62485-1 (VDE 0510-46) „Sicherheitsanforderungen an Batterien und Batterieanlagen – Teil 1: Allgemeine Sicherheitsinformationen“,
- E DIN EN IEC 62485-2 „Sicherheitsanforderungen an Batterien und Batterieanlagen – Stationäre Batterien“,
- DIN EN 62040-5-3 (VDE 0558-550-3) „Unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme (USV) – Teil 5-3: Methoden zum Festlegen der Leistungs- und Prüfanforderungen an Gleichstrom-USV“,
- DIN EN 50171 (VDE 0558-508) „Zentrale Sicherheitsstromversorgungssysteme“,
- DIN EN 62253 (VDE 0126-50) „Photovoltaische Pumpensysteme – Bauartegnung und Prüfung des Leistungsverhaltens“.

9.4 Mobility/DC-gekoppelte Ladestation

Bereits verfügbare Normen:

- VG 96916 „Elektrische Bordnetze für Landfahrzeuge“,
 - Teil 2: „12-V- und 24-V-Gleichspannungsbordnetze, Allgemeine Grundlagen“,
 - Teil 5: „Gleichspannungsbordnetze, Technische Spezifikation, Anforderungen an Bordnetze und Nachweisprüfungen System und Baugruppen“,
 - Teil 20: „Multi-Voltage-System mit Gleichspannungs-Zwischenkreis, Auslegung und elektrische Schutzmaßnahmen, Technische Spezifikation“,
- DIN EN 61557 (VDE 0413-X) Elektrische Sicherheit in Niederspannungsnetzen bis AC 1 000 V und DC 1500 V – Geräte zum Prüfen, Messen oder Überwachen von Schutzmaßnahmen,
 - Teil 8: „Isolationsüberwachung für IT-Systeme“,
 - Teil 9: „Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche in IT-Systemen“,
- IEC 60092 Elektrische Anlagen auf Schiffen,
 - Teil 101: „Begriffsbestimmungen und allgemeine Anforderungen“,
 - Teil 202: „Systemauslegung und Schutz“,
 - Teil 304: „Halbleiterumformer“,
 - Teil 305: „Akkumulatoren-Batterien“,
 - Teil 501: „Zusätzliche Anforderungen an elektrische Fahranlagen“,
 - Teil 503: „Besondere Merkmale. Wechselstromnetze mit Spannungen über 1 kV bis einschließlich 15 kV“,
- DIN EN 62477-1 (VDE 0558-477-1) „Sicherheitsanforderungen an Leistungshalbleiter-Umrichtersysteme und –betriebsmittel“,
- DIN EN 61000 (VDE 0839) „Elektromagnetische Verträglichkeit“,
- DIN EN 60664 (VDE 0110) „Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen“,
- DIN VDE 0100-200 (VDE 0100-200) „Errichten von Niederspannungsanlagen – Begriffe“,
- DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410) „Errichten von Niederspannungsanlagen – Schutz gegen elektrischen Schlag“,
- DIN VDE 0100-520 (VDE 0100-520) „Errichten von Niederspannungsanlagen – Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Kabel- und Leitungsanlagen“,
- DIN VDE 0100-530 (VDE 0100-530) „Errichten von Niederspannungsanlagen – Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Schalt- und Steuergeräte“,
- DIN VDE 0100-717 (VDE 0100-717) „Errichten von Niederspannungsanlagen – Anforderungen für Betriebsstätten, Räumen und Anlagen besonderer Art – Elektrische Anlagen auf Fahrzeugen oder in transportablen Baueinheiten“,
- ISO 6469 „Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Sicherheitsanforderungen“,
 - Teil 1: „On-Board-wiederaufladbares Energiespeichersystem (RESS)“,
 - Teil 2: „Fahrzeugbetriebssicherheitsmittel und Schutz gegen Ausfälle“,
 - Teil 3: „Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag“,
 - Teil 4: „Anforderungen an die elektrische Sicherheit nach Unfall“,
- ISO 7637-3 „Road vehicles – Electrical disturbances from conduction and coupling“,
 - Part 3: „Electrical transient transmission by capacitive and inductive coupling via lines other than supply lines“,
- ISO 16750 „Straßenfahrzeuge – Umgebungsbedingungen und Prüfungen für elektrische und elektronische Ausrüstungen“,

- DIN EN 61851 (VDE 0122) „Elektrische Ausrüstung von Elektro-Straßenfahrzeugen – Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge“,
 - Teil 1: „Allgemeine Anforderungen“,
 - Teil 21: „Anforderung eines Elektrofahrzeuges für konduktive Verbindung an AC/DC-Versorgung“,
 - Teil 22: „Wechselstrom-Ladestation für Elektrofahrzeuge“,
 - Teil 23: „Gleichstromladestationen für Elektrofahrzeuge“,
 - Teil 24: „Digitale Kommunikation zwischen einer Gleichstromladestation für Elektrofahrzeuge und dem Elektrofahrzeug zur Steuerung des Gleichstromladevorgangs“,
- DIN EN 62196 (VDE 0623-5) „Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker – Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen“,
- ISO 23273 „Brennstoffzellenfahrzeuge – Sicherheitsspezifikation – Schutz vor Gefahren resultierend aus dem im Fahrzeug integrierten Treibstoffsystem für komprimierten Wasserstoff“.

9.5 Photovoltaik (PV)

Aus der Umstellung des Haus- und ggf. Verteilnetzes auf DC ergeben sich potenzielle Vorteile bei Nutzung von PV-Anlagen im Haushaltsbereich im Vergleich zum Status Quo des aktuellen AC-Betriebs. Hierzu gehört z. B. die Minimierung der Wandlungsverluste durch direkte Nutzung der Erzeugung. Anstatt eines Wechselrichters ist hier lediglich ein DC/DC-Wandler notwendig, wobei dieser auch mit Verlusten behaftet ist. Eventuell vorhandene Überschüsse können sinnvoll entweder lokal gespeichert oder in überlagerte Netze eingespeist werden.

Zusätzlich würde die Überwachung der Messgröße „Frequenz“ primär entfallen. Weiterhin ist jedoch auf die Überwachung der Messgrößen „Energienmenge“ und „Spannung“ zu achten, wobei der Aufwand als gleichbleibend zu beurteilen ist.

Als problematisch erweist sich der Spannungsfall bei Übertragung höherer Leistungen der PV-Anlage im Hausnetz bei Spannungen < 50 V. Eine Lösung könnte hier ggf. ein doppelter Ausgang am DC/DC-Wandler der PV-Anlage sein, um einen direkten Netzanschluss zum Leistungsabtransport bei Größenordnungen mehrerer kW zu gewährleisten. Empfehlenswerter ist jedoch ein ähnliches Spannungsniveau wie aktuell im AC-Betrieb zu erhalten (230 bzw. 400 V).

Es ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen auf Basis der vorhandenen Normenlage:

- VDE AR N 4105 „Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“
 - Grundsätzlich weiter geeignet
 - Erfordernis der Kraftwerkseigenschaften:
 - Kurzschlussleistung (auch für Schutztechnik);
 - Stabilisierung des Energiehaushalts für das Netz → Spannungsstabilisierung muss unter dem Gedanken der Micro-Grids neu bewertet werden.
- DIN EN 50160 „Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen“
 - Toleranzband (0,4 kV +/- 10 %) muss erhalten bleiben.
- DIN VDE V 0124-100 „Netzintegration von Erzeugungsanlagen – Niederspannung – Prüfanforderungen an Erzeugungseinheiten vorgesehen zum Anschluss und Parallelbetrieb am Niederspannungsnetz“

- Anpassung auf DC-Netz notwendig, da einige Prüfverfahren evtl. entfallen würden (z. B. Wechselrichter) bzw. andere ergänzt werden müssen (DC/DC-Wandler).
- DIN VDE 0100-712 (VDE 0100-712) „Errichten von Niederspannungsanlagen Teil 7-712: Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art – Photovoltaik- (PV)-Stromversorgungssysteme“. Je nach Zielrichtung stellen sich grundsätzliche Fragen, wie z. B.
 - Ist eine Umstellung nur im Haushalt oder ggf. auch in den Netzebenen 6+7 angedacht?
 - Welche Nennspannung ist im Haus- bzw. Netzbereich als geeignet vorzusehen?
 - Wie soll das übergeordnete Umsetzungsziel aussehen? (allgemeine Strategie/Zielrichtung)

9.6 Telekommunikationsbetriebsstellen

Telekommunikationssysteme werden schon seit Einführung der Nachrichtenübermittlung i. d. R. mit Gleichspannung versorgt. In Europa hat sich eine Nennspannung von -48 V DC durchgesetzt, in Deutschland wurden die Systeme bis zur Ausbreitung des Mobilfunknetzes fast ausschließlich mit -60 V DC betrieben (siehe auch ETSI-Standard ETSI EN 300 132-2).

In Telekommunikationsbetriebsstellen wird die hohe Energieverfügbarkeit durch zentrale unterbrechungsfreie Gleichspannungssysteme sichergestellt. So arbeiten dort Gleichrichtersysteme mit Batterien (i. d. R. Bleisäure-Batterien) im Bereitschaftsparallelbetrieb. Diese unterbrechungsfreie Gleichspannungsversorgung (UGV) hat sich über Jahrzehnte als sichere Versorgungsform bewährt. Die Gründe für Bevorzugung dieser Technik gegenüber einer unterbrechungsfreien Wechselspannungsversorgung (UWV) sind vielfältig:

- weniger Wandlungsschritte (elektronische Bauelemente in Telekommunikationssystemen arbeiten mit kleiner Gleichspannung);
 - höhere Effizienz
 - weniger Komponenten
- geringere Komplexität (Verteilen und Zusammenschalten von Netzen);
- hohe Verfügbarkeit (keine aktiven Komponenten zwischen Pufferbatterie und Verbrauchern).

Die verwendeten geringen Betriebsspannungen haben jedoch auch einen Nachteil. Sie erfordern aufgrund der höheren Stromstärke auch höhere Strombelastbarkeiten aller Komponenten. So sind in den Systemen hohe Querschnitte für Kupferschienen, -kabel und -leitungen verbaut.

Durch den stetigen Wandel der Kommunikationsnetze und das Zusammenwachsen mit Datenverarbeitungs- und Speichersystemen werden immer mehr klassische Wechselspannungsverbraucher (Rechner/Server) in den gleichen Räumen wie klassische Gleichspannungsverbraucher betrieben. Telekommunikations- und Informationstechnologienetze sind so schon in den letzten Jahren zusammengewachsen. Dieser Trend wird sich fortsetzen.

Zu klären bleibt:

- Welche Spannungsart und welches Spannungsniveau bildet hier das Optimum für die zukünftige unterbrechungsfreie Stromversorgung?
- Oder bleibt die Notwendigkeit mehrere Netze mit unterschiedlicher Spannung aufzubauen?

9.7 Rechenzentren

Die Betreiber von Rechenzentren sind bestrebt, nicht nur die Investitionskosten, sondern auch die Betriebskosten merklich zu reduzieren. Bei den Betriebskosten lag der Fokus der vergangenen Jahre primär auf effizienten USV-Anlagen (Online-Technologie) als auch auf der Klimatechnik im Allgemeinen. Neben dem Einsatz von indirekter und direkter freier Kühlung, wurden die Zuluft-Temperaturen für das IT-Equipment sukzessive angehoben. Während in den 80er und 90er Jahren noch 16°C im Rechenzentrum als normal angesehen wurden, sind heute 24°C und sogar höhere Temperaturen zulässig. Ausgehend davon, dass 1°C Temperaturerhöhung ca. 5 bis 7 % Energieeinsparung nach sich zieht, waren dies bisher Meilensteine auf dem Weg zu „Green IT“.

Nachdem man sich jahrelang auf die Optimierung der Klimatechnik in Rechenzentren konzentriert hat, fällt seit ca. 2 bis 3 Jahren der Fokus auf die Energieversorgung selbst. Das Ziel, die Energieversorgung von Rechenzentren zu optimieren, aber gleichzeitig die Ausfallsicherheit beizubehalten oder sogar noch zu steigern, stellt eine große Herausforderung an die Hersteller und die Betreiber gleichermaßen dar.

Mit der Energiewende in Deutschland wurden u. a. folgende Maßnahmen beschlossen:

- Ausstieg aus der Kernenergie bis Ende 2022;
- Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch bis 2020 auf 18 %, bis 2030 auf 30 %, bis 2040 auf 45 % und bis 2050 auf 60 %;
- Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch auf 35 % bis 2020, auf 50 % bis 2030, auf 65 % bis 2040 und auf 80 % bis 2050. Wichtigste Grundlage dafür ist die seit Januar 2012 geltende Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG);
- Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2020 um 40 %, bis 2030 um 55 %, bis 2040 um 70 % und bis 2050 um 80 bis 95 % (gegenüber dem Basisjahr 1990);
- Reduktion des Primärenergieverbrauchs bis 2020 um 20 % und bis 2050 um 50 %;
- Steigerung der Energieproduktivität auf 2,1 % pro Jahr in Bezug auf den Endenergieverbrauch;
- Reduktion des Stromverbrauchs bis 2020 um 10 % und bis 2050 um 25 % (gegenüber 2008).

All diese Maßnahmen wurden beschlossen, nachdem bereits viele Rechenzentren klimatechnisch optimiert wurden. Speziell die Integration erneuerbarer Energien in das Gesamtkonzept eines Rechenzentrums wurde bisher nur vereinzelt realisiert. In der Regel wurden große PV-Farmen in der Nähe von Rechenzentren platziert, um den Effekt „Green IT“ optisch zu erzeugen. Ein direkter Zusammenhang zwischen dem Betrieb des Rechenzentrums und der PV-Farm bestand aber nicht. Auch diese Art von Parallelbetrieb wird sich durch die Reduzierung der Fördergelder und somit steigende Investitionskosten für erneuerbare Energien ändern.

Ein technischer Lösungsansatz vereint alle politischen, technischen und wirtschaftlichen Anforderungen der IT-/TK-Branche: Gleichstrom.

Gleichstrom scheint aus heutiger Sicht die Lösung aller Forderungen und Anforderungen zu sein, was folgende Argumente belegen sollen:

Die Verwendung von Gleichstrom zielt ganz klar auf die Vorteile höhere Verfügbarkeit (Ausfallsicherheit) und Effektivität ab. Bedingt durch die Gleichspannung entfallen die aufwändigen PFC-Filter (PFC; en: Power Factor Correction) in den Netzteilen. Diese Filter enthalten u. a. relativ große Elektrolytkondensatoren, welche

über die Jahre austrocknen können und den Neustart eines Servers evtl. nicht mehr gewährleisten. Weiterhin generieren moderne Schaltnetzteile sog. Oberwellen im Netz, welche seitens der Netzbetreiber nicht erwünscht sind und aus Sicht der IT anderes Equipment schädigen können.

Aus Sicht der Effektivität verringert sich durch den Wegfall der Gleichrichtung am Eingang eines Wechselstrom-Netzteils der Energieverbrauch insgesamt.

Als kleiner Nebeneffekt verringert sich außerdem der Platzbedarf der Netzteile, was wiederum Vorteile für die interne Luftführung mit sich bringt und dadurch weitere positive Auswirkungen hat.

Betrachtet man die Kette der Wandlungsprozesse, so führt die Verkettung von neuem durchaus effizienten Equipment, letztendlich zu einem unbefriedigenden Gesamtwirkungsgrad.

Auch diese Wandlungsprozesse, speziell innerhalb eines USV-Netzes, würden durch die Verwendung von Gleichstrom eliminiert und zwangsläufig zu einer weiteren Effizienzsteigerung führen.

Letztendlich würde sich bei der Verwendung von Gleichstrom im Rechenzentrum auch die Integration von erneuerbaren Energien erheblich erleichtern. USV-Anlagen neuester Generation erlauben den direkten Anschluss von PV- oder Windkraft-Anlagen an die USV-Anlage, welcher ihrerseits die generierte Gleichspannung mit der Batteriezwischenkreisspannung koppelt und die Gleichspannung am Ausgang entsprechend regelt.

Abgesehen von höherer Verfügbarkeit und höherer Effektivität im laufenden Betrieb, gibt es für die TK-Branche einen weiteren Aspekt zur Kostenreduzierung. Bisher werden in der TK-Branche 48 Volt-Gleichstrom eingesetzt. Diese niedrige Spannung hat zur Folge, dass große elektrische Leistungen sehr hohe Stromstärken voraussetzen und diese wiederum hohe Kabelquerschnitte. Da Kupfer als Rohstoff sehr teuer ist, könnte die Verwendung von 380 V DC zusätzlich zu dem bisher genutzten Kleinspannungsbereich zu einer deutlichen Reduzierung der Kabelquerschnitte und somit zur Reduzierung der Investitionskosten bei Neubaumaßnahmen führen.

9.7.1 Normung/Planung/Sicherheit

Das Projekt „Das erste kommerziell genutzte 380 V Gleichstromnetz in Deutschland“ (siehe Kapitel 10.4) hat deutlich gezeigt, welche Lücken sowohl auf der Normungs- als auch auf der Produktseite noch bestehen. Die folgende Auflistung spiegelt die wesentlichen Probleme/Lücken wieder.

Erdung

Können oder müssen Gleich- und Wechselspannungskomponenten direkt auf eine Erdungsschiene geführt werden oder ist es besser, beide innerhalb des Gebäudes getrennt zu führen? (Potentialunterschiede und Spannungsüberlagerungen als Gefahrenquelle)

Schleifenimpedanz

Nach der Errichtung einer Niederspannungsanlage ist unter anderem eine Messung der Schleifenimpedanz mit Netzfrequenz zur Kontrolle der Abschaltbedingungen durchzuführen. Diese Messung nach DIN VDE 0100-600 (VDE 0100-600) ist insbesondere gefordert, wenn der Schutz bei indirektem Berühren durch automatische Abschaltung mittels Überstromschutzeinrichtungen erfolgt. Die Messergebnisse sind in



Prüfprotokollen schriftlich festzuhalten und dem Betreiber der Anlage auszuhändigen. Diese Messung konnte nicht durchgeführt werden, weil entsprechendes Equipment (Messgeräte) fehlt.

Isolationsmessung

In Deutschland wird der Anlass für Isolationsmessungen in den berufsgenossenschaftlichen Vorschriften „DGUV Vorschrift 3“ (ehemals BGV A3) geregelt. Die Messung erfolgt in einzelnen Schritten der Reihenfolge Schutzleiter (PE) gegen Neutralleiter (N) und dann Schutzleiter gegen alle Außenleiter (L1, L2, L3). Gemessen wird durch kurzzeitige Einspeisung einer hohen Messspannung bei geringer Kapazität der Stromquelle, um das Ausbilden eines Brandes zu vermeiden. Der Zusammenbruch der Messspannung ist dann Indiz für einen Isolationsfehler oder Überschlag. Bedingt durch die Tatsache, dass in einem TNS-Netz entsprechend der ETSI-Norm ein Außenleiter mit der Erde direkt verbunden ist, ist diese Messung auch nur bedingt durchführbar.

Eine Isolationsmessung hat jedoch auch den Nachteil, dass bei einer Wiederholungsprüfung die angeschlossenen Betriebsmittel in der Anlage durch die hohe Messspannung 500 V DC eventuell beschädigt und deshalb abgeklemmt werden müssten. Dies ist jedoch bei einem 24 h-Betrieb nicht möglich. Einen Lösungsweg dazu zeigt die neue Norm DIN IEC 60364-6 (VDE 0100-600):2017-06 „Prüfungen“ bzw. DIN VDE 0105-100/A1 VDE 0105-100/A1:2017-06 Teil 100: Allgemeine Festlegungen; Änderung A1: Wiederkehrende Prüfungen. Die Isolationsmessung kann entfallen, wenn der Stromkreis dauernd durch ein RCM nach DIN EN 62020 (VDE 0663) oder ein IMD nach DIN EN 61557-8 (VDE 0413-8) überwacht werden würde. Zurzeit sind DC-RCMs noch nicht genormt. Für DC-Systeme ist es dafür notwendig, dass DIN EN 62020 (VDE 0663) im Hinblick auf DC-RCMs überarbeitet wird.

Personenschutz

Da ein Rechenzentrum prinzipiell als elektrischer Betriebsraum angesehen werden kann, ist der Einsatz von RCDs nicht notwendig und aus Gründen der Verfügbarkeit (Ausfallsicherheit) auch nicht erwünscht. Daher stehen als präventive Schutzmaßnahme zwei Möglichkeiten zur Verfügung: IT-System mit Isolationsüberwachung (IMD) oder TN-S System mit Differenzstrom-Überwachung (RCM).

Einige USV-Hersteller haben bereits eine integrierte Isolationsüberwachung, welche jedoch mit extern verbauten Isolationsüberwachungssystemen z. B. in der Unterverteilung nicht kommuniziert. Es wird deshalb empfohlen, die Isolationsüberwachungsgeräte nach DIN EN 61557-8 (VDE 0413-8) mit Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche (IFLS) nach DIN EN 61557-9 (VDE 0413-9) zu kombinieren, die über entsprechende Schnittstellen miteinander kommunizieren können. Hier sollte eine spätere LVDC-Norm klare Vorgaben machen und die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Herstellern klar definieren.

Notbeleuchtung

In Bürogebäuden wird die Notbeleuchtung klassisch durch Unterspannungsrelais angesteuert, d. h. bei Unterschreiten des Schwellwertes wird die Notbeleuchtung eingeschaltet. Hierfür gibt es derzeit keine Unterspannungsrelais für Gleichspannung.

Sicherungsautomaten

Derzeit verfügbare Sicherungsautomaten sind bis maximal 250 V DC geeignet. Dies hat zur Folge, dass in einem TNS- und IT-Netz ein zweipoliges Gerät für 380 V DC bzw. -190/+190 V DC verwendet werden muss.





9.7.2 Kabel/Kabelbezeichnung

Losgelöst von dem Gedanken, ausschließlich neue Gebäude exklusiv mit Gleichstrom zu betreiben, wird innerhalb der nächsten Jahre die Migration von DC-Micro-Grids in bestehende Gebäude eine größere Rolle einnehmen. Somit kommt es auch zur Vermischung von AC- und DC-Installationen. Hierbei fehlt eine klare Vorgabe, welche Aderfarben und Mantelfarben die Gleichstromkabel haben müssen oder sollten. Es wäre sinnvoll Gleichstromkabel auch äußerlich klar von AC-Kabeln unterscheiden zu können. In dem Projekt „Das erste kommerziell genutzte 380 V Gleichstromnetz in Deutschland“ (siehe Kapitel 10.4) wurden die Abgänge in den Unterverteilungen als auch die Eingänge an den Endgeräten entsprechend gekennzeichnet: „Achtung 380 V DC Gleichstrom“. Dabei wurden Standardkabel verwendet, welche für 0,6/1 kV Nennspannung geeignet waren. Auch in Bezug auf die Nennspannung (Spannungsfestigkeit) sollten die Vorschriften/Normen aussagekräftig definiert werden.



9.7.3 Steckverbinder/Steckzyklen

Bei den Steckverbindern muss die Norm zukünftig sowohl zwischen laienbedienbar und nicht-laienbedienbar als auch zwischen werkzeuglos und nicht-werkzeuglos trennbar unterscheiden. Gleiches gilt auch für Steckzyklen, welche sich z. B. bei einer PV-Anlage und einem Küchengerät oder Laptop deutlich unterscheiden. Im Rechenzentrumsumfeld gibt es diesbezüglich keinen Standard. In dem in Kapitel 10.4 beschriebenen Projekt wurde ein Stecker eingesetzt, welcher bis 20 A für 200 Stückzyklen ausgelegt und werkzeuglos trenn-/steckbar ist. Auch hierfür sollte die zukünftige LVDC-Norm klare Vorgaben machen.

9.8 Power-over-Ethernet (PoE)

PoE wird seit etwa 1999 für kleine Endgeräte (z. B. IP-Telefone, Kameras) in Computernetzen verwendet. In den vergangenen Jahren wird nun PoE vermehrt in Smart-Buildings wie modernen Bürogebäuden, Hotels und Krankenhäusern eingesetzt. Durch PoE kann ein Endgerät gleichzeitig an ein Datennetzwerk angeschlossen und mit elektrischer Leistung versorgt werden, wobei das Kupfer im Kabel doppelt genutzt wird.

PoE ist im IEEE 802.3-2015 Standard beschrieben, welcher derzeit in der IEEE Task Force P802.3bt auf die Nutzung des gesamten Kupfers im Netzkabel also aller vier Adernpaare erweitert wird [71]. Im sogenannten „4-pair PoE“ tragen sowohl das Adernpaar A (RJ45 Stecker Anschlüsse 1, 2, 3, 6) als auch das Adernpaar B (RJ45 Stecker Anschlüsse 4, 5, 7, 8) zur Datenübertragung als auch zur Stromversorgung bei.

Ein PoE-System besteht aus dem sogenannten PSE (en: power sourcing equipment; PoE-Quelle) und sogenannten PDs (en: powered devices; PoE-Last). Jedes PD wird an einem eigenen Netzwerkanschluss des PSE betrieben. PSEs können sogenannte PoE-Midspan-Devices ohne jede Datenfunktionalität sein oder PoE-Switches die sowohl als Datenswitch als auch als Stromversorgung dienen.

PoE entwickelte sich in drei Generationen: Bei IEEE 802.3af betrug die PSE-Ausgangsleistung je Port maximal 15 W, bei IEEE 802.3at waren es bereits 30 W und der zukünftige „bt“-Standard berücksichtigt 90 W.

9.8.1 PoE - Power Negotiation

Der PoE Standard legt einen Verhandlungsmechanismus zwischen PD und PSE fest, der aus Detektion und einem Klassifizierungsmechanismus besteht. Diese sogenannte „PoE - Power Negotiation“ stellt sicher, dass nur gültige PoE PDs mit Spannung versorgt werden und dass das PSE und das PD sich über die maximal verfügbare Leistung einigen. Der Verhandlungsmechanismus ist unabhängig von der Ethernet-Funktionalität. So ist sichergestellt, dass ein Endgerät mit Leistung versorgt werden kann, bevor die Software gestartet ist.

Die Betriebsspannung bei PoE liegt zwischen 50 V und 57 V auf der PSE-Seite und kann nicht durch den Verhandlungsmechanismus angepasst werden. Die PoE-Spannungsquelle erfüllt dabei SELV-Anforderungen. Ein PD hat den Laststrom abzuschalten, sobald die PoE-Spannung auf der PD-Seite unter 37 V fällt. Die Spannungspegel während des Verhandlungsprozesses liegen unter 20 V.

PDs haben besondere Isolationsanforderungen. Von außen zugängliche elektrische Kontakte dürfen galvanisch nicht mit anderen elektrischen Geräten verbunden werden. Auf diese Weise werden Brummschleifen wirkungsvoll verhindert. PSEs dürfen mehrere ihrer Netzwerkanschlüsse von einer einzigen Spannungsversorgung betreiben. Die Netzwerkanschlüsse sind daher nicht voneinander isoliert.

Die PoE Leistungsübertragung kann über die Netzwerkverbindung überwacht und verhandelte Parameter können nachträglich verändert werden.

Standardkonforme PSEs verfügen über Überspannungs- und Überstromabschaltmechanismen. Nach jeder Abschaltung muss eine neuerliche PoE-Verhandlung gestartet werden, bevor wieder PoE-Spannung angelegt werden kann. PSEs können auch abschalten, wenn ein PD die verhandelte Maximalleistung überschreitet. Die Ströme in den Netzkabeln sind bei PoE begrenzt. Für den IEEE Std 802.3-2015-Standard beträgt der Maximalstrom je Leiter 0,3 A. Hier sind maximal 2 Adernpaare genutzt. Daraus ergibt sich ein maximaler Hin- und Rückleiterstrom im Kabel von 1,2 A. PSEs dürfen unter keinen Umständen mehr als 100 W in ein Kabel einspeisen und entsprechen somit den Limited-Power-Supply-Anforderungen nach [72].

9.8.2 Verkabelung für PoE-Systeme

PoE hat eine erstaunlich hohe Effizienz bei der Übertragung der elektrischen Leistung über Netzwerkverkabelung [73]. Diese Studie hat die Eigenschaften einer typischen Netzwerkverkabelung untersucht. Für 2-Pair-Systeme überschreiten die mittleren Verluste nicht 3,4 % wenn CAT5e-Kabel eingesetzt werden und bleiben unter 2 % bei CAT6A-Kabeln. Für 4-Pair-Systeme bis 51 W sind die Ergebnisse die gleichen. Für High-Power-4-Pair-Systeme (bis 73 W), betragen die Verluste mit CAT5e 4,6 %, und 2,6 % mit CAT6A. Für hohe Leistungen sollten demnach höherklassige Verkabelung verwendet werden um die Verluste klein zu halten. Darüber hinaus ist die Verdrahtung in Ethernet Netzwerken sternförmig und daher muss immer nur der Strom einer einzelnen Last übertragen werden.

Typische Netzkabel sind CAT5e mit 8 Leitern mit 24 AWG-Querschnitt. Jeweils zwei Leiter sind miteinander paarweise verschlagen und formen ein Leiterpaar. Der bisherige Standard erlaubte zwei Leiterpaare für die Leistungsübertragung zu nutzen. Der neue „bt“-Standard wird zukünftig die Nutzung aller vier Leiterpaare

erlauben. Das bedeutet dass entweder 50 % oder 100 % des Kupfers im Kabel auch für die Stromübertragung genutzt werden.

Ethernet-Kabel wie Cat5 oder Cat6 sind typischerweise bis zu Temperaturen von 60°C spezifiziert. Bei Temperaturen über 60°C verändern sich die Hochfrequenzeigenschaften und die Datenübertragung kann nicht mehr garantiert werden. Die PoE-Verkabelung muss auch bei Leiterbündeln so ausgeführt werden, dass 60°C an keiner Stelle im Kabel überschritten werden.

9.8.3 Steckverbinder für PoE-Systeme

Der typische Ethernet-Steckverbinder ist der US-amerikanisch genormte RJ45-Stecker, der aufgrund seiner vollbestückten 8 Pole auch als 8P8C-Modularstecker bezeichnet wird. Obwohl der Stecker ursprünglich für statische Datenverkabelung entwickelt wurde, verfügt er doch über eine hohe Stromtragfähigkeit bis zu 1 A je Kontakt. Die Kontaktflächen bei einer fertig gesteckten Verbindung sind andere als während des Steckvorganges. Hierdurch sind sogar mehrere Steckzyklen unter Last ohne Verschlechterung des Übergangswiderstandes möglich [74]. Diese Studie von Bel Stewart Connector untersuchte das Verhalten von Ethernet-Steckverbindern unter Strombelastung. Die Leistung bei einer der durchgeführten Untersuchungen war 20 W je Kontakt. Der „Low Level Contact Resistance“ (LLCR) wurde zu Beginn und nach jeweils 80 Zyklen bestimmt. Insgesamt wurden 800 Steckzyklen ausgeführt ohne dass sich die Kontaktqualität drastisch veränderte.

Da PoE bei sehr niedrigen Spannungen und Strömen verhandelt, sind die Kontakte beim Einstecken immer stromlos. Im Moment des Ausziehens eines Steckers stellt PoE sicher, dass nach maximal 300 ms bis 400 ms die Spannung von den Kontakten genommen wird. Offene Netzwerkdosen oder aufgetrennte Netzkabel sind immer spannungsfrei. Erst nach Erkennung einer gültigen Verbindung zu einem PD und erfolgreicher Verhandlung wird die PoE-Spannung zur Verfügung gestellt.

10 PROJEKTE UND FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN

PROJEKT	BEARBEITER	THEMA	HOMEPAGE
DCSich	DKE, FTZ	Auswirkung von Gleichstrom (DC) auf den menschlichen Körper im Rahmen der Elektromobilität und versorgender DC-Infrastruktur	https://www.dke.de/de/themen/projekte/dcsicherheit
IsKoNeu	DKE, Bender	Isolationskoordination: Bemessung von Luft- und Kriechstrecken unter Umgebungsgesichtspunkten in neuen Anwendungen	https://www.dke.de/de/themen/projekte/iskoneu
FEN	FEN/RWTH Aachen	Forschungscampus Flexible Elektrische Netze	https://www.fenaachen.net/
Schaufenster Elektromobilität	BMW, RWE, DB, TU Dresden, ABB	Elektromobilität Verbindet – DC Ladestation am Olympiapark	http://schaufenster-elektromobilitaet.org/de/content/projekte_im_ueberblick/projekt_2568.html
Smart Modular Switchgear (SMS)	TU Braunschweig, gefördert durch BMWi und BMBF	Das Forschungsprojekt SMS beschäftigt sich mit der Erforschung und Entwicklung von Schalt- und Schutzkonzepten für den Einsatz in Gleichstromnetzen unterschiedlicher Spannungsebenen.	http://forschung-strom-netze.info/projekte/gleichstromschalter-trennen-lasten/
DCC+G	Siemens etc.	DC Components and Grids – Gleichstrom in Gebäuden	http://www.baulinks.de/webplugin/2012/1328.php4
DC-Industrie	Fraunhofer IISB, Siemens	Bedarfs-orientierte Verteilung von Energie innerhalb von Produktionsanlagen	www.dc-industrie.de
DC-Schutzorgane	Fraunhofer IISB	Entwicklung eines neuen, integrierten Schutzkonzepts und neuer Schutzorgane für zukünftige Niederspannungs-Gleichstromnetze	

Tabelle 15 – Projekte im Gleichstrom-Bereich

10.1 DCSich – Auswirkung von Gleichstrom (DC) auf den menschlichen Körper im Rahmen der Elektromobilität und versorgender DC-Infrastruktur



Der Bereich der Niederspannung (Wechselspannungen bis 1 000 V und Gleichspannungen bis 1 500 V) spielt für die elektrische Sicherheit eine besondere Rolle, da die meisten von Laien bedienten Geräte in diesem Spannungsbereich betrieben werden. Dabei stellt der elektrische Schlag bei Berühren die Hauptgefahr für den Menschen und für Nutztiere dar. Eine weitere Unfallursache sind sogenannte Sekundärnfälle, z. B. durch Stürze. Allgemein wird angenommen, dass Gleichstrom, zumindest hinsichtlich der Gefahr von Herzkammerflimmern, ungefährlicher ist als Wechselstrom. Allerdings gibt es in der Literatur Hinweise für „besondere Effekte“, welche nur bei Gleichstromunfällen auftreten.

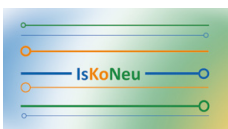
Für Gleichspannungen existieren bereits grundlegende Festlegungen und Schutzkonzepte, jedoch ist aufgrund der in den letzten Jahrzehnten geringen wirtschaftlichen Bedeutung der Gleichspannung im Bereich einiger hundert Volt die Erfahrungsbasis deutlich kleiner als bei Wechselspannung. In den nächsten Jahren wird jedoch eine enorm wachsende Bedeutung von Gleichspannungsanwendungen in der Energietechnik (z. B. Antriebstechnik) erwartet. Durch Fortschritte bei Leistungshalbleitern werden dabei Konzepte Verwendung finden, die vor wenigen Jahren noch nicht wirtschaftlich realisierbar waren. Für den Anwendungsfall Elektromobilität beinhaltet dies den Betrieb und das DC-Laden von Elektrofahrzeugen. Dies betrifft insbesondere die Möglichkeit der Erschließung höherer Spannungsebenen (ca. 400 V DC) im Fahrzeug.

Das Forschungsprojekt DCSich wurde gemeinsam von der DKE und dem Forschungs- und Transferzentrum Leipzig e.V. ins Leben gerufen und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Das Verbundprojekt startete im August 2012 und konnte im November 2014 erfolgreich abgeschlossen werden. Eine zusätzliche fachliche Begleitung erfolgte durch eine projektbegleitende Arbeitsgruppe (PBA), in der sich u. a. Vertreter von Berufsgenossenschaften, Verbänden, Hochschulen und der Industrie, einbrachten. Mit dem Projekt DCSich wurden folgende Ziele verfolgt:

- Verbesserung der Erkenntnisse über die Wirkung von Gleichstrom auf den menschlichen Körper;
- Ausarbeitung einer Übersicht zu den möglichen Wirkungen von Gleichströmen mit einer Wertung hinsichtlich der Relevanz für die verschiedenen Anwendungen;
- Überprüfung der Aussagen zur Schwelle für das Herzkammerflimmern bei Gleichstrom und Bestätigung der alten oder Ableitung von neuen Grenzwerten;
- Überprüfung der Modelle und typische Unfallsituationen durch Simulationen für verschiedene Anwendungen;
- Erarbeitung von Schutzkonzepten für den Personen- und Anlagenschutz.

Zur Beantwortung der offenen Fragen wurden Recherchen und Simulationen durchgeführt. Durch die Auswertung älterer experimenteller Untersuchungen, konnten neue Tierversuche vermieden werden.

10.2 IsKoNeu



Der verstärkte Einsatz elektrotechnischer und elektronischer Komponenten in neuen Anwendungen, wie der Elektromobilität oder der PV, mit Gleichspannungen von einigen 100 V wirft neue Fragen der Isolationskoor-

dination auf, insbesondere vor dem Hintergrund der besonders zu berücksichtigenden Umgebungseinflüsse, wie beispielsweise Verschmutzung, Betauung usw. Es ergibt sich die Notwendigkeit, die bisherigen Erkenntnisse bei der Berechnung von Luft- und Kriechstrecken für solche Umgebungsbedingungen, kritisch zu hinterfragen.

Auf dieser Basis sollen Sicherheitsgrenzwerte bestätigt oder neu aufgestellt und entsprechende Schutzkonzepte und Prüfungen entwickelt werden. Die Schutzkonzepte und Prüfungen sollen in Normen überführt und damit der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Es ist vorgesehen, die Öffentlichkeit und insbesondere die Fachöffentlichkeit über geeignete Informationskanäle zu unterrichten.

Ziel des Projektes ist es unter anderem neue Berechnungsvorschriften zu erarbeiten oder bestehende zu aktualisieren. Weitere Ziele sind:

- Erarbeiten von Normen und Spezifikationen;
- Aktualisieren bestehender Publikationen;
- wissenschaftliche und öffentlichkeitswirksame Publikationen;
- Erarbeiten von Schulungen und Seminaren.

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderte Projekt „Isolationskoordination: Bemessung von Luft- und Kriechstrecken unter Umgebungsbedingungen in neuen Anwendungen“ wurde abgeschlossen und in einem Ergebnisbericht zusammengefasst. Dieser ist über die Homepage der DKE verfügbar.

10.3 Forschungscampus Flexible Elektrische Netze FEN/RWTH Aachen

Der Forschungscampus FEN ist ein Zusammenschluss von 15 Instituten der RWTH Aachen University und 22 Industriepartnern aus unterschiedlichen Fachbereichen. Um die Herausforderungen der zukünftigen Energieversorgung erfolgreich zu meistern, wird ein hohes Maß an transdisziplinärer Forschung und fachübergreifenden Kooperationen benötigt, da viele verschiedene Fachdisziplinen betroffen sind. Im Forschungscampus FEN findet diese transdisziplinäre Forschung zwischen Wissenschaft und Industrie unter einem Dach statt. Durch die gemeinsame Forschung der wissenschaftlichen und industriellen Partner wird die anwendungsorientierte Forschung vorangetrieben: Forschungsergebnisse können von den Industriepartnern schnell in innovative Produkte oder Dienstleistungen umgesetzt werden. Das Modell des Forschungscampus basiert auf der gleichnamigen Förderinitiative „Forschungscampus – öffentlich-private Partnerschaft für Innovationen“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), das damit die langfristige Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft unterstützt.

Ziel des Forschungscampus FEN ist die Erforschung und Entwicklung innovativer Technologien für zukünftige elektrische Netze mit einem hohen Anteil an regenerativen und dezentralen Energiequellen. Die Experten im Forschungscampus FEN analysieren, wie die Gleichspannungstechnologie (DC) in unser zukünftiges Energieversorgungssystem integriert werden kann. Die Forschung hierzu umfasst verschiedene Forschungsfelder: Netzplanung und -betrieb, Automatisierung und Regelung, Standards und Normen, Cloud-Plattform für intelligente Energiedienstleistungen, Leistungsumwandlung und Komponenten sowie nicht-technische Aspekte, wie gesellschaftliche Akzeptanz sowie biologische, ökologische, städtebauliche und ökonomische Aspekte.

Der Forschungscampus FEN ist organisatorisch in drei Konsortien (Nieder-, Mittel-, Hochspannung) untergliedert.

Die Konsortien sind in sogenannte Communities unterteilt, in denen unterschiedliche thematische Schwerpunkte behandelt werden.

Im Fokus der Forschungsarbeit steht eine Optimierung der Energieversorgung und -verteilung auf niedriger Spannungsebene. Automatisierung im Gebäudebereich, Vernetzung über unterschiedliche Domänen hinweg (elektrisch/thermisch/Kommunikation), der Einsatz von Gleichspannungstechnik (DC) und die Einbindung erneuerbarer Energiequellen sind weitere betrachtete Aspekte. Weiterhin ist eine aktive Beteiligung an der Entwicklung von Normen und Standards für Gleichspannungssysteme vorgesehen.

Die Struktur des Niederspannungs-Konsortiums ist in Abbildung 20 dargestellt.

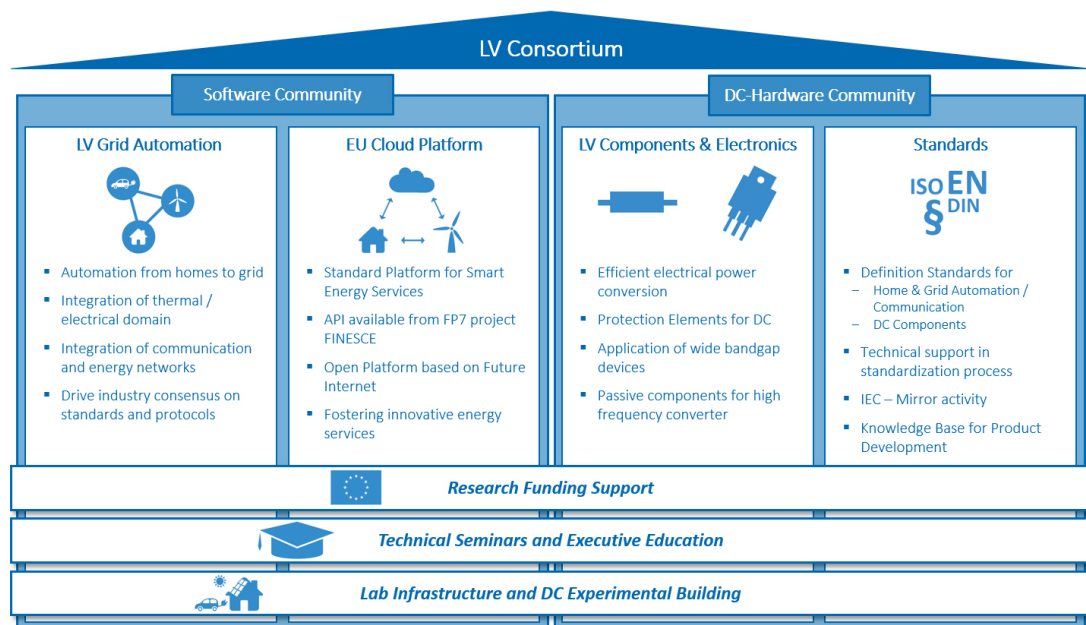


Abbildung 19 – Struktur des Niederspannungs-Konsortiums [58]

Ergänzt werden die fachspezifischen Themenbereiche durch Querschnittsaktivitäten, zu denen auch eine Laborinfrastruktur und ein Gleichspannungsmodellgebäude gehören.

10.4 Das erste kommerziell genutzte 380 V Gleichstromnetz in Deutschland

Die Bachmann GmbH & Co. KG in Stuttgart hat die Herausforderung angenommen und in Stuttgart das erste kommerziell genutzte DC-Micro-Grid in einem Bürogebäude installiert. Neben der IT-/TK-Technik werden auch die Klimatechnik und die Beleuchtung direkt mit 380 V DC betrieben.

Im Fokus aller Aktivitäten waren von Beginn an die allgemeinen Anforderungen an heutige Rechenzentren und die Sicherheit in Bezug auf Personenschutz. Daher hat die Bachmann GmbH & Co. KG frühzeitig ein erfahrenes Planungsbüro aus dem Bereich Gebäude- und RZ-Planung beauftragt, welches in enger Absprache

mit dem TÜV und dem VDE beide Anforderungen vereint. Schnell wurde klar, dass bisher aus der Wechselspannung bekannte Normen und vor allem Produkte für Gleichspannung nicht verfügbar waren.

Beim Erdungskonzept hat sich die Bachmann GmbH & Co. KG am Standard ETSI EN 301605 orientiert, welcher im Oktober 2013 final verabschiedet wurde.

Ausgehend von diesem Standard, hat sich die Bachmann GmbH & Co KG an den Normen der Reihe DIN VDE 0100 (VDE 0100) zum Personenschutz orientiert. Als ein Beispiel sei hier die sichere Trennung/Unterbrechung aller stromführenden Leitungen im Fehlerfall erwähnt.

10.5 DC-Industrie

Ziel des Forschungsprojektes „DC-Industrie“ (<https://dc-industrie.zvei.org/>) ist die bedarfsorientierte Verteilung von Energie innerhalb von Produktionsanlagen mit einem Höchstmaß an Energiewiederverwendung und einer Minimierung von Wandlungsverlusten. Dabei soll die Möglichkeit bestehen, regenerative Energiequellen und Energiespeicher einfach und flexibel einzubinden. So wird die Energieeffizienz in der Produktion deutlich gesteigert und die Erschließung weiterer Potenzialfelder über die isolierte Optimierung von Einzelgeräten hinausgehend ermöglicht. Eine über das DC-Netz versorgte Produktion ist robust hinsichtlich schwankender Netzqualität und kann flexibel auf schwankende Energieangebote reagieren. Das trägt zu einer Stabilisierung des Energienetzes bei. Wichtige Schritte zur Zielerreichung sind standardisierte Schnittstellen, die Erhöhung der Leistungsdichte innerhalb der elektrischen Antriebe sowie der Wegfall dezentraler AC/DC-Wandlung in den Umrichtern.



10.6 DC-Schutzorgane – Entwicklung eines neuen, integrierten Schutzkonzepts und neuer Schutzorgane für zukünftige Niederspannungs-Gleichstromnetze

In dem auf drei Jahre angelegten Konsortialprojekt „DC-Schutzorgane“ arbeiten spezialisierte Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen an einem intelligenten, effizienten und ganzheitlichen Schutzkonzept für moderne Gleichstromnetze. Beteiligt sind E-T-A, ABL, DEHN + SÖHNE, Phoenix Contact, Bender, Bachmann sowie Fraunhofer IISB und Cluster Leistungselektronik im ECPE e. V. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.

Entsprechend monopolisierter Sternstrukturen erfolgt bislang die Absicherung der Netzinfrastruktur vom Kraftwerk bis zum Verbraucher mit immer feiner und schneller auslösenden Schutzkomponenten. Zunehmend erfordern aber auch Quellen nahe beim Verbraucher – etwa PV-Anlagen und elektrische Energiespeicher – den Einsatz gleichstromgeeigneter Schutzvorrichtungen. Darüber hinaus stellen Anwendungsfälle wie Energierückspeisung oder Inselbetrieb völlig neue Anforderungen an die Schutz- und Schalttechnik. Im Gegensatz zur Wechselstromtechnik existieren für die Installation und den sicheren Betrieb von Gleichstromnetzen bislang kaum einheitliche Standards. Genau hier setzen die Projektpartner an und entwickeln ein effizientes und ganzheitliches Schutzkonzept für moderne Gleichstromnetze. Genau aufeinander abgestimmte Komponenten für Leitungs- und Überspannungsschutz sowie Fehlerstrom- und Isolationsüberwachung

werden zu einem intelligenten Schutz-Gesamtsystem zusammengefügt, in das die neuesten Entwicklungen auf den Gebieten der Leistungselektronik, Sensorik und Kommunikationstechnik einfließen. Intelligente Vernetzung und Kommunikation einzelner Schutz- und Schaltkomponenten untereinander sorgen dabei für höchste Ausfallsicherheit und einen zuverlässigen Betrieb. Adressiert werden vor allem Betreiber von Gleichstromnetzen, wie z. B. Telekommunikationsunternehmen, Rechenzentren, Supermärkte und auch zunehmend Industriebetriebe, Stromversorger, Anbieter von PV-Systemen oder Elektromobilitäts-Dienstleister.

11 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNG/AKRONYM	BEDEUTUNG
AAL	Active Assisted Living.
AC	Alternating Current
AFDD	Arc Fault Detection Device
AFE	Active Front End
AIEE	American Institute of Electrical Engineers
AuS	Arbeiten unter Spannung
BG ETEM	Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
BWEA	British Wind Energy Association
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
COC	Connector without breaking Capacity
DC	Direct Current
DCC+G	Direct Current Components +Grid
DGUV	Deutschen gesetzlichen Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
EFK	Elektrofachkräfte
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EUP	elektrotechnisch unterwiesene Personen
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Program
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
GdV	Gesamtverband der deutschen Versicherer
HFT	Hardware-Fehler-Toleranz
HLKK	Heizung, Lüftung, Klima, Kältetechnik

ABKÜRZUNG/AKRONYM	BEDEUTUNG
IC-CPD	In Cable Control and Protective Device
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IRE	Institute of Radio Engineers
ISO	International Organization for Standardization
IT	Isole Terre
ITU	International Telecommunication Union
LED	Light-Emitting Diode
LEMP	Lightning Electromagnetic Pulse
LPL	lightning protection level
LPS	Lightning Protection System
LVD	Niederspannungs-Richtlinie
LVDC	Low Voltage Direct Current
MIL-STD	Military Standard
NAV	Niederspannungsanschlussverordnung
NEC	National Electric Code
PELV	Protective Extra Low Voltage
PFC	Power Factor Correction
PFD	Probability of a Failure on Demand
PFH	Probability of a dangerous Failure per Hour
PoE	Power over Ethernet
PRCD	Portable Residual Current Device
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
PSE	power sourcing equipment

ABKÜRZUNG/AKRONYM	BEDEUTUNG
PV	Photovoltaik
PWM	Pulsweitenmodulation
RCD	Residual Current Device
RCM	Residual Current Monitor
SC	Subcommittee
SEG	Strategy Evaluation Group
SELV	Safety Extra Low Voltage
SGAM	Smart-Grid Architecture Model
SIL	Safety Integrity Level
SK	Schutzklasse
SMS	Smart Modular Switchgear
SPD	Surge Protective Devices
SWR	Südwestrundfunk
SyC	System Committee
TBINK	Technischer Beirat Internationale und Nationale Koordinierung
TFA	Trägerfrequenzanlagen
TC	Technical Committee
TN	Terre Neutre
TOV	Temporary Over Voltage
TT	Terre Terre
UPS	Uninterruptible Power Supply
USB	Universal Serial Bus
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

- [1] P. Savage, R. R. Nordhaus und S. Jamieson, DC Microgrids: Benefits and Barriers, 2010
- [2] U. Böke, R. Dr. Weiss, P. Meckler und L. Ott, Gleichstromnetze für kommerziell genutzte Gebäude, 2013
- [3] C. L. Sulzberger, Triumph of AC - From Pearl Street to Niagara, IEEE Power Magazine, Bd. 1, 2003
- [4] A. Prechtel, Vorlesungen über die Grundlagen der Elektrotechnik, Springer, Wien, 2007
- [5] P. Schönhuber, Grundlagen und Anwendung der Supraleitung, Wien, 2011
- [6] T. Kaufmann, Simulation des Betriebes eines DC Netzes, Wien, 2013
- [7] A. F. Wendelin, Gleichstromversorgung in Verteilnetzen - Potential und Sicherheitsaspekte, 2014
- [8] M. Lavarbe, Électronique de Puissance, Frankreich, 1998
- [9] J.-P. Ferrieux und F. Forest, Alimentations à découpage, Convertisseurs à resonance, 2006
- [10] J. Winders, Power Transformers – Principles and Applications, USA, 2002
- [11] P. Waeckerlé, Potential of using Low Voltage Direct Current in local distribution network to improve the overall efficiency, Stockholm, 2011
- [12] M. März, Niederspannungs-Gleichstromnetze - Eine thematische Einführung, Erlangen, 2012
- [13] L. Ott, U. Böke und R. Weiss, Energieeffiziente Gleichstromnetze für kommerziell genutzte Gebäude, ETG-Kongress 2013 – Energieversorgung auf dem Weg nach 2050 – Symposium 1: Security in Critical Infrastructures Today, Berlin, 2013
- [14] Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz – EnWG)
- [15] Tomaj Najafi: DC-Netz in der Energieversorgung, Master-Thesis an der Fachhochschule Kiel, 2015
- [16] Edel, Herbert (1991): Fibel der Elektrodiagnostik und Elektrotherapie. Mit 22 Tabellen. 6., bearb. Aufl. Berlin: Verl. Gesundheit.
- [17] Osypka, P., Messtechnische Untersuchungen über Stromstärke, Einwirkungsdauer und Stromweg bei elektrischen Wechselstromschlägen an Mensch und Tier, Bedeutung und Auswertung für Starkstromanlagen, 1963
- [18] Antoni, H.; Biegelmeier, G., Über die Wirkungen von Gleichstrom auf den Menschen, 1978
- [19] DEHN + SÖHNE GmbH
- [20] Siemens AG
- [21] Prof. Dr.-Ing. Andreas F.X. Welsch, Abschlussbericht „Projekt: DC-Hausinstallation“, Hochschule Regensburg
- [22] DIN EN 50495 (VDE 0170-18):2010-10, Sicherheitseinrichtungen für den sicheren Betrieb von Geräten im Hinblick auf Explosionsgefahren, VDE-Verlag
- [23] DB Netz AG
- [24] IEC 60364-4-44:2015-09 - Low-voltage electrical installations – Part 4-44: Protection for safety – Protection against voltage disturbances and electromagnetic disturbances
- [25] Karppanen, J., T. Kaipia, P. Nuutinen, A. Lana, P. Peltoniemi, A. Pinomaa, A. Mattsson, J. Partanen, Jintae Cho, and Jaehan Kim, Effect of Voltage Level Selection on Earthing and Protection of LVDC Distribution Systems, In AC and DC Power Transmission, 11th IET International Conference, 2015
- [26] Dragicevic, Tomislav, Xiaonan Lu, Juan Vasquez, and Josep Guerrero, DC Microgrids Part II: A Review of Power Architectures, Applications and Standardization Issues, IEEE Transactions on Power Electronics, 2015

- [27] DIN EN 50343:2014-09; VDE 0115-130:2014-09 - Bahnanwendungen - Fahrzeuge – Regeln für die Installation von elektrischen Leitungen; Deutsche Fassung EN 50343:2014
- [28] R. Dr. Höfer-Zyga, E. Dr.-Ing. Oswald und M. Dipl.-Ing. Heidric, Smart Grid Communications 2020, Fraunhofer-Einrichtung für Systeme der Kommunikationstechnik ESK, München, 2011
- [29] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Die Deutsche Normungs-Roadmap E-Energy / Smart Grid 1.0, Frankfurt, 2010
- [30] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Normungs-Roadmap E-Energy / Smart Grids 2.0, Frankfurt
- [31] Andren, F., R. Brundlinger, and T. Strasser. "IEC 61850/61499 Control of Distributed Energy Resources: Concept, Guidelines, and Implementation." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 29, no. 4 (December 2014):1008–17. doi:10.1109/TEC.2014.2352338.
- [32] DIRECTIVE 2006/95/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 12 December 2006 on the Harmonization of the laws of Member States relating to electrical equipment designed for use within certain voltage limits
- [33] Philips: Solar-powered LED luminaires from Philips can brighten the homes of millions, <http://www.newscenter.philips.com/main/standard/news/press/2015/20150319-solar-powered-led-luminaires-from-philips-canbrighten-the-homes-of-millions.wpd>
- [34] United Nation: Millennium Development Goals and Beyond 2015, www.un.org/millenniumgoals/global.shtml
- [35] USB Implementers Forum: www.usb.org
- [36] Philips
- [37] NXP Semiconductors: SSL3401HN Low voltage dimmable MR16 7W LED driver, <http://www.nxp.com/board/SSL3401DB1174>
- [38] Philips: Solar powered LED lighting systems, <http://www.lighting.philips.com/main/products/solar.html>
- [39] National Fire Protection Association: National Electric Code 2014 Edition, <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/documentinformation-pages?mode=code&code=70>
- [40] Emerge Alliance: Occupied Space Standard, <http://www.emergealliance.org/Standards/OccupiedSpace/Overview.aspx>
- [41] Emerge Alliance: Occupied Space Standard Registered Products, <http://www.emergealliance.org/Products/RegisteredProducts.aspx>
- [42] IEEE Standardization Project P802.3af: DTE Power via MDI Task Force, www.ieee802.org/3/af/
- [43] IEEE Standardization Project P802.3at: DTE Power Enhancements Task Force, www.ieee802.org/3/at/
- [44] RP-Technik: Safety Power Supply Systems, Catalogue 2014, <http://www.rpttechnik.de/anlagen/epaperausgabepdf?rnd=53147cc9124.de>
- [45] CENELEC: Central power supply systems, European standard EN50171, Edition 2013-07
- [46] IEC: D.C. supplied electronic ballasts for tubular fluorescent lamps – General and safety requirements, Standard IEC 60924, First Edition 1990
- [47] IEC: AC and DC-supplied electronic control gear for tubular fluorescent lamps – Performance requirements, Standard IEC 60929, Edition 4.0, 2011
- [48] IEC: DC or AC supplied electronic control gear for LED modules – Performance requirements, Standard IEC 62384, Edition 1.1, 2011

- [49] European Telecommunications Standards Institute: 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, European Standard ETSI EN 300 132-3-1 V2.1.1, 2012
- [50] Emerge Alliance: Data/Telecom Center Standard, <http://www.emergealliance.org/Standards/DataTelecom/Overview.aspx>
- [51] Direct Current BV: www.directcurrent.eu/en
- [52] IEC: Low-voltage electrical installations – Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions, Standard IEC 60364-1, 5th Edition, 2005
- [53] DirectCurrent BV: DC in the Greenhouse, <http://www.directcurrent.eu/en/projects/dc-in-greenhouse>
- [54] ARE. "Hybrid Mini-Grids for Rural Electrification: Lessons Learned." Brussels: Alliance for Rural Electrification, 2011. "http://www.ruralelec.org/fileadmin/DATA/Documents/06_Publications/Position_papers/ARE_Mini-grids_-_Full_version.pdf".
- [55] ESMAP. "BEYOND CONNECTIONS; Energy Access Redefined." Technical Report. Washington D.C., June 2015.
- [56] MicroEnergy International GmbH
- [57] Bachmann Systems GmbH & Co. KG
- [58] RWTH Aachen
- [59] DIN IEC 61482-1-1: Live working - Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc - Part 1-1: Test methods - Method 1: Determination of the arc rating (ATPV or EBT50) of flame-resistant materials for clothing
- [60] DIN IEC 61482-1-2 (VDE 0682-306-2): Live working - Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc - Part 1-2: Test methods – Method 2: Determination of arc protection class of material and clothing by using a constrained and directional arc (box test)
- [61] DIN IEC 61482-2: Live working - Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc - Part 2: Requirements
- [62] Schau, H.; Glaser, S.; Linse, W.: Energetische Verhältnisse bei Störlichtbögen in Drehstromsystemen und Gleichstromsystemen, Technischer Bericht Nr. 2016-01/BG, TU Ilmenau, Fachgebiet Elektrische Energieversorgung, Ilmenau, 08/2016
- [63] Schau, H.; Glaser, S.; Linse, W.: Beurteilung der Gefährdung durch Störlichtbögen bei Arbeiten in Gleichstromsystemen, Technischer Bericht Nr. 2017-01/BG, TU Ilmenau, Fachgebiet Elektrische Energieversorgung, Ilmenau, 07/2017
- [64] Ranzinger, R.; Schmidt, J.; Schau, H.: Ergebnisse von Versuchen zur Ermittlung der Gefahren durch Gleichspannungslichtbögen bei einem Kurzschluss der Batterie oder Teilbatterien. In: Abschlussbericht Verbundprojekt eProduction, Produktionsforschung zu Hochvolt-speichersystemen für die Elektromobilität", Hrsg.: AUDI AG und Projektpartner, Booklet 2016, S. 265-275
- [65] DGUV-I 203-077 (vormals BGI/GUV-I 5188): Thermische Gefährdung durch Störlichtbögen - Hilfe bei der Auswahl der persönlichen Schutzausrüstung, Information, Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), Edition Oktober 2012]
- [66] IEC 63027 Ed. 1 - DC arc detection and interruption in photovoltaic power systems, Committee Draft document of the IEC TC 82: SOLAR PHOTOVOLTAIC ENERGY SYSTEMS, 2017
- [67] DIN EN 50171:2001-11; VDE 0558-508:2001-11, Zentrale Stromversorgungssysteme; Deutsche Fassung EN 50171:2001 + Corrigendum:2001-08

- [68] DIN VDE 0100-560 (VDE 0100-560):2013; Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 5-56: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel - Einrichtungen für Sicherheitszwecke (IEC 60364-5-56:2009, modifiziert)
- [69] U. Boeke, R. Weiss, A. Mauder, L. Hamilton, L. Ott: DCC+G White Paper "Efficiency Advantages of ± 380 V DC Grids in Comparison with 230 V/400 V AC Grids", http://dcgrid.tue.nl/files/2014-05-05_DCC+G-White_Paper_Efficiency_Advantages_of_DC_Power_Grids_v1-0.pdf
- [70] Das Forschungsprojekt "DC Industrie", <https://dc-industrie.zvei.org> Beleuchtungssysteme mit 216 V DC
- [71] IEEE: DTE Power via MDI over 4-Pair Task Force, <http://www.ieee802.org/3/bt/>
- [72] IEC: Information Technology Equipment – Safety – Part 1: General requirements, Standard IEC 60950-1, 2nd Edition, 2005
- [73] Theo Brillhart: Survey of ~60000 installed and tested cabling links, March 2015, http://www.ieee802.org/3/bq/public/mar15/brillhart_ngeabt_01a_0315.pdf
- [74] Yakov Belopolsky: Durability of Connecting Hardware under Electrical Load for Power-over-Ethernet Applications, Presentation to IEEE Meeting, Seoul 2007, http://www.ieee802.org/3/at/public/2007/09/belopolsky_1_0907.pdf
- [75] H. ML Wong: Reasons for using LVDC in Data Centers, 2012, https://docbox.etsi.org/workshop/2012/201206_eeworkshop/04_technical-solutions/intel_wong_lvdc.pdf

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE
Stresemannallee 15
60596 Frankfurt

Tel. +49 69 6308-0
dke@vde.com
www.dke.de

