

DC-NETZE PRÜFEN

PROFITEST PRIME UND
METRACELL BT PRO



AUSGANGSSITUATION AC-TOPOLOGIE

Das aktuell vorherrschende Netz in Europa ist ein symmetrisches, dreiphasiges Wechselspannungsnetz mit einer Frequenz von 50 Hz und vier verschiedenen Spannungsebenen. Abbildung 1-a zeigt schematisch die vier Spannungsebenen. Die vorliegende Betrachtung beschränkt sich auf die Niederspannungsebene bis 1000 V_{AC} bzw. 1500 V_{DC}.

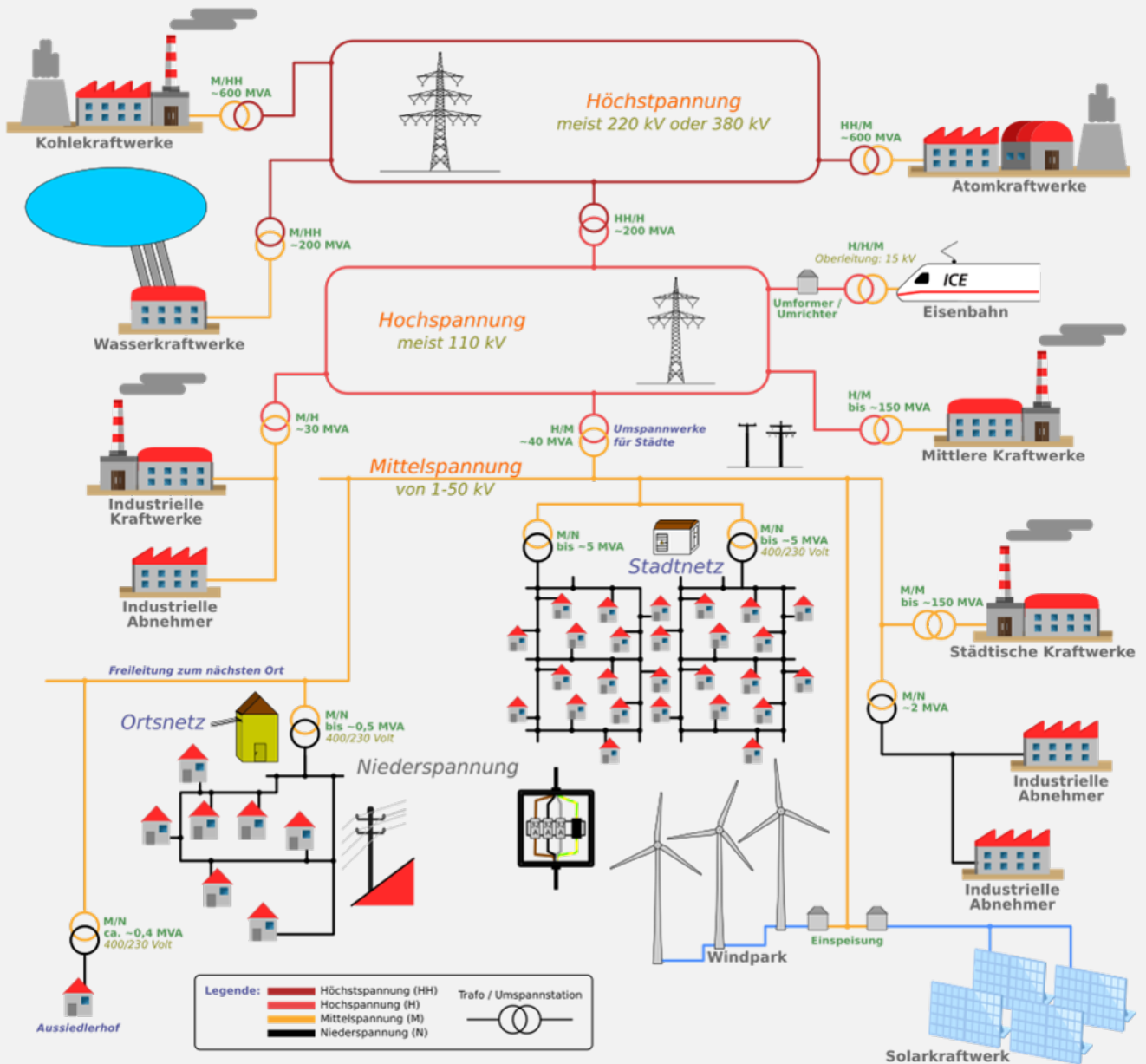


Abbildung 1-a¹

Trotz dem vorherrschenden AC-Netz gibt es insbesondere im Niederspannungsbereich eine Vielzahl von DC-Anwendungen, die eine jeweils lokale AC/DC-Wandlung erfordern. Zur Reduzierung von Wandlungsverlusten und zur Unterstützung der Energiewende gibt es Bestrebungen die AC/DC-Wandlung lokal für ein vollständiges Subnetz anstatt für einzelne Anwendungen zu betreiben. Das betrifft sowohl den Gebäude- als auch den Industriebereich.

¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Stromnetz#/media/Datei:Stromversorgung.svg>

Wegweisende Pilotprojekte sind DCC+G², DC-Sich³, DC-Schutzorgane⁴, DC-Industrie⁵ und DC-Industrie2⁶.

ANWENDUNGSGEBIETE DC-NETZE

Eine Vielzahl der DC-Anwendungen sind aus dem Alltag kaum noch wegzudenken. Dazu zählen vor allem Netzteile für Kommunikationselektronik wie z.B. batteriebetriebene Mobilfunkgeräte und Notebooks. Der elektrische Strom wird aus dem AC-Niederspannungsnetz zur Verfügung gestellt und durch einen meist leistungselektronischen Wandler in DC der Anwendung zugeführt.

Bislang sind DC-Netze vor allem in folgenden Bereichen zu finden:

- Rechenzentren (380V)
- Telekommunikationsbereich (48V/60V)
- Photovoltaikanlagen (bis 1500V)
- Stromversorgung von Schiffen (1000V)

DC-NETZE IN DER INDUSTRIE

Dass die direkte Versorgung einzelner Anwendungen mit Gleichstrom durch ein lokales DC-Netz auch im Industriebereich durchaus sinnvoll ist, soll an Abbildungen 2-a und 2-b verdeutlicht werden. Diese zeigen eine Photovoltaikanlage mit Energiespeicher zur Versorgung von Antriebssystemen. Der elektrische Gleichstrom aus dem Photovoltaikgenerator wird in einem Energiespeicher zwischengespeichert. Die einzelnen Anwendungen werden über einen gemeinsam DC-Bus direkt mit Gleichstrom versorgt und ggfs. überschüssige Energie kann durch einen bidirektionalen DC/AC-Wandler dem Niederspannungsnetz zugeführt werden. Statt der herkömmlichen mehrfachen Wandlung AC/DC/AC und AC/DC bzw. DC/AC wird durch eine neue DC-Topologie die Anzahl der Wandlungen und damit die auch die Summe der Wandlungsverluste reduziert. Zudem wird die Ausfallsicherheit erhöht und die Anschlussleistung reduziert.

Das Projekte „DC Industrie“ tritt auf vielfältige Weise den Beweis an, dass neue Anwendungsgebiete von DC-Netzen wie z.B. im Maschinenbau sowohl ökonomisch als auch ökologisch zukunftsweisend sind.

Aktuelle Forschungsergebnisse werden beim ZVEI unter <https://dc-industrie.zvei.org/> zusammengeführt. Weitere Anwendungsgebiete sind große LED-Beleuchtungsanlagen in gewerblich genutzten Gebäuden sowie die Kombination aus PV-Anlage, Energiespeicher und Ladepunkt als nachhaltige Stromversorgung für Elektrofahrzeuge.

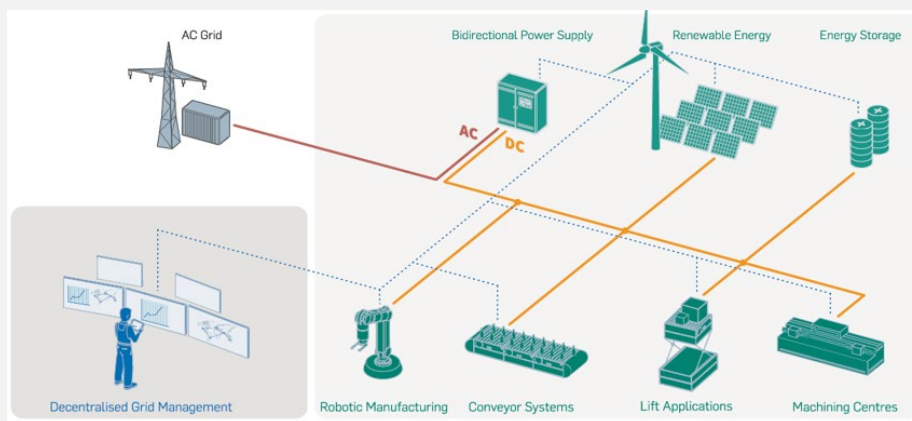


Abbildung 2-a⁷

² <https://cordis.europa.eu/project/id/296108> 2012 bis 2015

³ <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/energy/dc-sicherheit> 2012 bis 2014

⁴ 4DC-Schutzorgane: Entwicklung eines neuen, integrierten Schutzkonzepts und neuer Schutzorgane für zukünftige Niederspannungs-Gleichstromnetze

⁵ <https://dc-industrie.zvei.org/> 2016 bis 2019

⁶ <https://dc-industrie.zvei.org/> seit 2019

⁷ <https://dc-industrie.zvei.org/publikationen/energiewende-trifft-industrie-4.0>

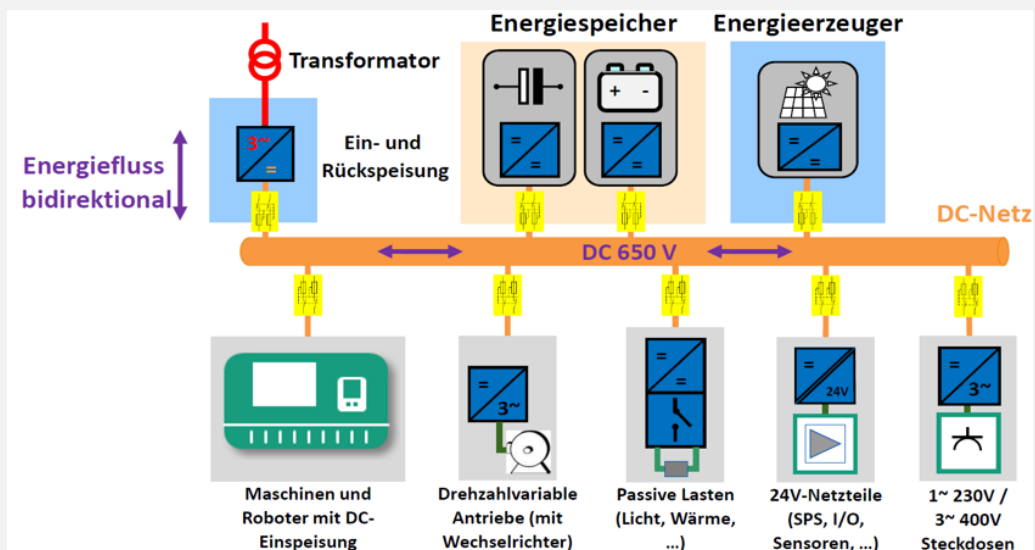


Abbildung 2-b⁸

GEFAHREN DES ELEKTRISCHEN GLEICHSTROMS

Die Schäden auf den menschlichen Körper sind im Wesentlichen von der Stromstärke und der Einwirkdauer abhängig. Dies gilt sowohl für AC als auch für DC. Es ist unbestritten, dass auch Gleichstrom gefährlich ist, wenngleich seine Auswirkungen nicht in derselben Tiefe erforscht sind wie bei Wechselstrom. Beispielsweise erlauben vorliegende Forschungsergebnisse⁹ keine Ableitung eines konkreten Schwellenwertes für eine Loslassschwelle bei Gleichstrom. Hinzukommt dass sich Gleichstrom anders anfühlt als Wechselstrom wie die folgende Tabelle zeigt. Insbesondere die Stromänderung beim Berühren oder Loslassen der Kontakte wird deutlich intensiver empfunden.

Wechselstrom	Gleichstrom		
Wirkungen	Stromstärke in mA	Wirkungen	
keine	bis 0,6	bis 2	keine
merklich, in steigender Intensität, Muskelkontraktion, aber willkürlich überwindbar	bis 0,6-6	is	leichtes Kribbeln
schmerzhaft, Loslassen in steigender Häufigkeit unmöglich	6-15	12	Wärmegefühl und verstärktes Kribbeln in den Handflächen, leichter Druck in den Handgelenken
Loslassschwelle fast immer überschritten, geringf. Wirkungen auf Atmung und Kreislauf	15-25	21	starker Druck bis Stechen in den Handgelenken
Loslassen unmöglich, steigende Wirkung auf Atmung und Kreislauf (Herzbeschleunigung, Rhythmusstörung, Blutdrucksteigerung, Atembehinderung)	25-50	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
steigende Gefahr von Herzkammerflimmern bei ($t > 1$ HP), starke Rhythmusstörungen, Herzstillstand, Atmung schwer behindert, Blutdrucksteigerung	50-80		Für diesen Stromstärkebereich liegen bislang keine Untersuchungsergebnisse vor
oft Kammerflimmern ($t > 1$ HP*)	80-120		
bei ($t < 1$ HP) steigt Flimmerwahrscheinlichkeit, bei ($t > 1$ HP) häufig tödlich.	120-800		
häufig Kammerflimmern, therm. Wirkungen	800-2.000		

*Durchströmung länger als eine Herzperiode

Abbildung 3-a¹⁰

⁸ <https://dc-industrie.zvei.org/dc-industrie2-projektvorstellung>

⁹ [https://Ergebnisse des Projektes DC-Sich It. Normungs-Roadmap Gleichstrom im Niederspannungsbereich V2 S.35](https://Ergebnisse%20des%20Projektes%20DC-Sich%20It.%20Normungs-Roadmap%20Gleichstrom%20im%20Niederspannungsbereich%20V2%20S.35)

¹⁰ https://etem.bgetem.de/6.2019/titelstories/kribbeln-im-koerper/document_view

AUSWIRKUNGEN AUF DEN MENSCHLICHEN KÖRPER

Abbildung 3-b verdeutlicht konventionelle Zeit-Stromstärke-Bereiche mit Wirkungen von Gleichströmen auf Personen:

- DC-1: leicht stechende Empfindung beim Ein- und Ausschalten oder bei schneller Änderung der Stromstärke
- DC-2: unwillkürliche Muskelkontraktionen wahrscheinlich, besonders beim Ein- und Ausschalten oder bei schneller Änderung des Stroms; üblicherweise keine schädlichen physiologischen Wirkungen
- DC-3: starke unwillkürliche Muskelkontraktionen und reversiblen Störungen der Reizbildung und Reizleitung im Herzen; kein organischer Schaden zu erwarten
- DC-4: pathophysiologische Wirkungen wie Herzstillstand, Atemstillstand und Verbrennungen oder andere Zellschäden; die Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern steigt mit Stromstärke und Durchströmungsdauer an.

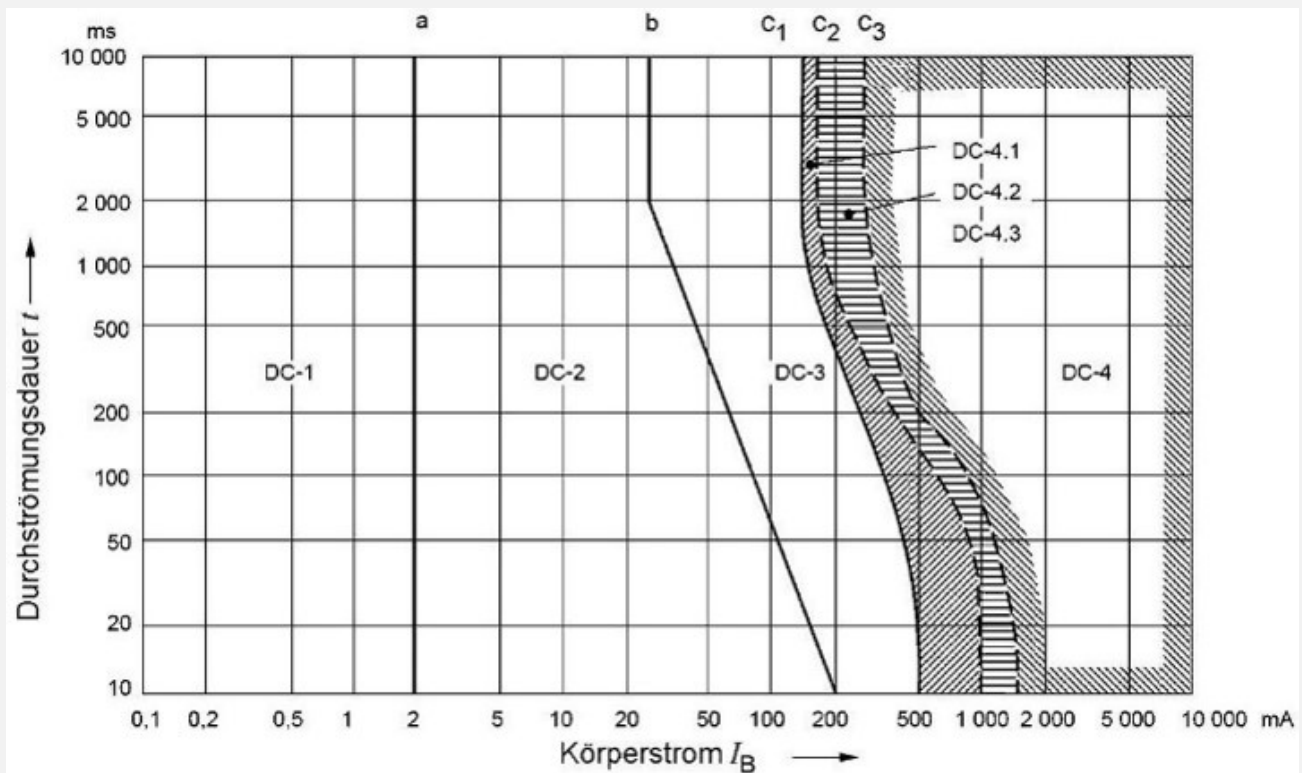


Abbildung 3-b¹¹

LICHTBOGEN UND CHEMISCHE KORROSION

Als DC-spezifische Gefahr sind die Entstehung von Lichtbögen aufgrund des fehlenden Nulldurchgangs beim Trennen und Schalten sowie der damit verbunden thermischen Einflüsse zu nennen. Auch auf verpolungssichere Steckverbindungen sei in diesem Zusammenhang hingewiesen. Indirekt sicherheitsrelevant ist das Auftreten von Streustromkorrosion¹² als chemische Korrosion in Einflussbereich von DC-Netzen.

¹¹ Bild 22 der DIN IEC/TS 60479-1 (VDE V 0140-479-1) 05/2007 <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/energy/dc-sicherh>

¹² <https://de.wikipedia.org/wiki/Streustromkorrosion>

NEUE SCHUTZKONZEPTE?

Expertengremien prüfen derzeit die Übertragbarkeit vorhandener AC-Schutzkonzepte auf DC-Netze. Der Arbeitskreis DKE/AK 221.6.3¹³ beispielsweise beschäftigt sich insbesondere mit den Fragen

- Wie sicher oder gefährlich ist Gleichstrom im Gegensatz zu Wechselstrom eigentlich?
- Reichen die bereits genormten (Wechselstrom-)Schutzkonzepte für Gleichstromanwendungen ggfs. aus? Und wenn nicht, wie müssen diese aussehen?

Der Arbeitskreis DKE/AK221.6.1 „Normungs-Roadmap“ als Nachfolger des TBINK_LVDC_AK_DC erarbeitet die Deutsche Normungs-Roadmap „Gleichstrom im Niederspannungsbereich“¹⁴. Die zweite Fassung der Normungs-Roadmap vom Jahr 2018 zeigt Hintergründe auf und gibt Handlungsempfehlungen auch im Hinblick auf Gefahren, Sicherheit und Prüfung.

MESSVERFAHREN

Die Anforderungen an Erstprüfung und wiederkehrende Prüfung elektrischer Anlagen sind sowohl für Wechsel- als auch für Gleichstromanlagen in DIN VDE 0100-600 (VDE 0100-600) bzw. DIN VDE 0105-100 (VDE 0105-100) enthalten. Im Folgenden soll eine Auswahl derjenigen Mess- und Prüfverfahren aufgeführt werden, welche auf Grund des DC-Netzes eine besondere Bedeutung erhalten.

NIEDEROHMIGE DURCHGÄNGIGKEIT

Die Prüfung der niederohmigen Durchgängigkeit R_{i0} der Schutzleiter und Schutzpotentialausgleichsleiter bzw. allgemein der Leiter erfolgt analog zu einem AC-Netz. Es sei jedoch darauf hingewiesen das auf Grund des erhöhten Leiterquerschnitts niedrigere Grenzwerte zu erwarten sind und ggfs. ein höherer Prüfstrom erforderlich ist.

ISOLATIONSWIDERSTAND

Die Prüfung des Isolationswiderstands R_{iSO} erfolgt analog zu einem AC-Netz. Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass die Alterung der Isoliermaterialien eines für AC ausgelegten Kabels unter Gleichspannung andersartig verläuft. Konkrete Untersuchungen zu Isoliermaterialien für Leitungen in DC-Netzen werden von der TU Ilmenau in Kooperation mit Lapp Kabel¹⁵ durchgeführt. Zudem kann je nach Anwendung auf Grund der hohen Zwischenkreisspannung eine Messung des Isolationswiderstands auf Grund von anliegender Fremdspannung erschwert werden.

ISOLATIONSWÄCHTER

Daher kommen zur kontinuierlichen Überwachung des Isolationswiderstands Isolationswächter zum Einsatz; bekannt aus IT-Netzen. Bei unterschreiten eines ersten kritischen Schwellenwertes wird ein Alarm ausgelöst. Der aufgetretene Isolationsfehler muss so schnell wie möglich lokalisiert und behoben werden. Spätestens bei Unterschreitung eines zweiten kritischen Schwellenwertes wird die Anlage abgeschaltet. Ein solcher Isolationswächter muss ebenfalls regelmäßig auf korrekte Funktionsweise, nämlich Alarmierung im Fehlerfall innerhalb der geforderten Zeitgrenze, überprüft werden. Dazu wird durch das Prüfgerät ein definierter Isolationsfehler erzeugt und die Zeit bis zur Alarmierung gemessen.

¹³ <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/core-safety/gleichstrom-industrie-energiegewende-elektromobilitaet-haushalt>

¹⁴ <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/energy/normungsroadmap-gleichstrom-im-niederspannungsbereich>

¹⁵ <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/isolationsverhalten-von-leitungen-aendert-sich-bei-gleichstrom-a-828241>

SCHLEIFENIMPEDANZ

Im Falle eines Erdschluss- oder Kurzschlussfehlers müssen die Schutzeinrichtung sowie die Leitungen so dimensioniert werden, dass eine sichere automatische Abschaltung innerhalb der geforderten Grenzen erfolgt. Zur Kontrolle der Einhaltung der Abschaltbedingungen wird die Fehlerschleifenimpedanz bzw. der Netzzinnenwiderstand Z_{loop} mit einem Prüfgerät gemessen und über die jeweilige Netzspannung der mögliche Kurzschlussstrom berechnet. Dabei ist zu beachten, dass die Messung der Impedanz mit Netzspannung durchzuführen ist. Dies gilt selbstverständlich auch in DC-Netzen. Zudem kann je nach Anwendung die zulässige Berührungsspannungsgrenze von 120 V überschritten und damit die Durchführung der Messung erschwert werden. Die E DIN IEC 60898-3 für Leitungsschutzschalter für reinen Gleichstrom wird zurzeit bei IEC/SC 23E erarbeitet.

RESTSPANNUNG

Die Überprüfung der Restspannung U_{res} ist in DC-Netzen besonders wichtig. Denn bei automatischer Abschaltung im Fehlerfall müssen auch die Abschaltzeiten nach DIN VDE 0100-410 eingehalten werden. Das bedeutet bei automatischer Abschaltung im Fehlerfall oder bei betriebsmäßiger Abschaltung muss die Spannung innerhalb der Abschaltzeiten auf ein ungefährliches Maß reduziert werden. In DC-Netzen kommen logischerweise viele DC-Betriebsmittel zum Einsatz. Diese sind häufig mit Kondensatoren in Eingangskreisen, Zwischenkreisen und/oder in Ausgangskreisen ausgestattet. Abhängig vom Aufbau der Eingangs- bzw. der Ausgangsschaltung eines DC-Betriebsmittels können daher gefährliche Restspannungen bzw. Rückspannungen in DC-Systemen auftreten. Zur Reduzierung der Gefahr können geeignete Einrichtungen wie z.B. Entladevorrichtungen, automatische Kurzschließvorrichtungen und geeignete Schalt- und Trennvorrichtungen verwendet werden. Zur Überprüfung der Restspannung und Abschaltzeiten wird ein geeignetes Prüfgerät benötigt. Dieses misst die Zeit während dem Absinken der Spannung bis unter die festgelegten Berührungsspannungsgrenzen.

FEHLERLICHTBOGEN-SCHUTZEINRICHTUNGEN

Durch die bereits angeführte Gefahr der Entstehung von Fehlerlichtbögen in einem DC-Netz auf Grund des fehlenden Nulldurchgangs gilt den Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtungen besondere Aufmerksamkeit. Forschungsergebnisse¹⁶ zeigen, dass die thermischen Auswirkungen und damit einhergehend die Brandgefahr von Gleichstromlichtbögen deutlich höher ist als von Wechselstromlichtbögen. Der Produktstandard E DIN EN 63027 für DC-Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtungen (AFDD) für serielle Lichtbögen in PV-Anlagen ist aktuell in Vorbereitung. Diese soll unter anderem die notwendigen Prüfverfahren zur Verfügung stellen. Zusätzlich sei bemerkt, dass lösbare Steckverbindungen in DC-Netzen, vor allem beim Trennen unter Last, ein erhebliches Verletzungsrisiko bergen. Auf die Ausführung verpolungssicherer und entsprechend isolierter Steckverbinder sollte daher im Rahmen der Sichtprüfung geachtet werden.

PRÜFGERÄTE

PROFITEST PRIME

Als sicherstes Prüfgerät seiner Produktklasse erfüllt der PROFITEST PRIME die Sicherheitskriterien für CAT III bis 600 V sowie CAT IV bis 300 V und ist gemäß DIN EN 61557 / VDE 0413 zum Prüfen, Messen und Überwachen von Schutzmaßnahmen im Niederspannungsbereich bis AC 1000 V und DC 1500 V zugelassen. Erstmals lassen sich auch Schleifenmessungen in reinen DC-Netzen bis 850 V Nennspannung sowie bei allstromsensitiven Fehlerstromschutzschaltern durchführen.

¹⁶ Prof. Dr.-Ing. Andreas F.X. Welsch, Abschlussbericht „Projekt: DC-Hausinstallation“, Hochschule Regensburg

Ebenso ist die messtechnische Überprüfung der korrekten Funktion von Isolationsüberwachungseinrichtungen möglich. Weitere Merkmale sind die Messung der niederohmigen Durchgängigkeit mit bis zu 25 A sowie die DC-Restspannungsmessung. Weil allein mit dem PROFITEST PRIME sowohl in 690 V AC- als auch in 850 V DC-Netzen geprüft werden kann reicht jetzt ein einziges Gerät, um neben Schaltschränken, Maschinen und Industrieanlagen auch die elektrische Sicherheit von Photovoltaik- und Windkraftanlagen sowie Ladestationen für die Elektromobilität zu testen. Besondere Flexibilität bietet der integrierte Akku, der bei fehlender Stromversorgung ausreichend Energie für bis zu tausend Messungen bereitstellt.



Abbildung 4¹⁷

METRACELL BT PRO

Der METRACELL BT PRO ist ein mobiles und multifunktionales Prüfgerät zur Evaluierung und Wartung von Batterieanlagen und unterbrechungsfreien Stromversorgungen (USV) zum Beispiel in Rechenzentren und DC-Netzen in Industrieanlagen. Mit dem METRACELL kann die Spannung sowie der elektrische und elektrochemische Widerstand eines Batterieblocks erfasst werden. Entladetests sind durch Erfassung von Entladestrom und Spannungsverlauf möglich. Dabei speichert das Gerät bis zu 30.000 Datensätze, die mit der mitgelieferten Batteriemanager-Software verwaltet und in Form von aussagefähigen Reports ausgegeben werden können. Der METRACELL BT PRO wird komplett mit Messzubehör, Ladenetzteil und Akkus im Transportkoffer geliefert.



Abbildung 5¹⁸

¹⁷ Prüfgerät PROFITEST PRIME Art.Nr. M506C von Gossen Metrawatt GmbH



¹⁸ Prüfgerät METRACELL BT PRO Art.Nr. M100B von Gossen Metrawatt GmbH

Autor

BERNHARD CASPARI
Product Manager
Gossen Metrawatt GmbH

Tel: + 49 911 8602-447
Fax: + 49 911 8602-80447
E-mail: bernhard.caspari@gossenmetrawatt.com

GMC INSTRUMENTS

 **GOSSEN METRAWATT**
 **CAMILLE BAUER**

Gossen Metrawatt GmbH

Südwestpark 15 ■ 90449 Nürnberg ■ Deutschland
Tel.: +49 911 8602-0 ■ Fax: +49 911 8602-669

www.gossenmetrawatt.com ■ info@gossenmetrawatt.com