

FNN-Hinweis



Störfestigkeit im Zusammenspiel

von Kundenanlagen und
Elektrizitätsnetzen

Impressum

© Forum Netztechnik / Netzbetrieb im VDE (FNN)

Bismarckstraße 33, 10625 Berlin

Telefon: + 49 (0) 30 3838687 0

Fax: + 49 (0) 30 3838687 7

E-Mail: fnn@vde.com

Internet: <http://www.vde.com/fnn>

August 2016

Störfestigkeit im Zusammenspiel von Kundenanlagen und Elektrizitätsnetzen

Inhalt

Einleitung	10
1 Anwendungsbereich	11
2 Normative Verweisungen	12
3 Begriffe und Abkürzungen	14
3.1 Begriffe	14
3.1.1 Anlagenbetreiber	14
3.1.2 Anschlussnutzer [VDE-AR-N 4101]	14
3.1.3 Betriebsspannung [IEV 601-01-22]	14
3.1.4 Bezugsspannung (für die Ermittlung von Spannungsunterbrechungen, - einbrüchen und -überhöhungen) [DIN EN 50160]	14
3.1.5 Dauer eines Spannungseinbruchs [DIN EN 50160]	14
3.1.6 Elektrizitätsversorgungsqualität [IEV 617-01-07]	14
3.1.7 Elektromagnetische Verträglichkeit [IEV 161-01-07]	15
3.1.8 Elektromagnetischer Verträglichkeitspegel [IEV 161-03-10]	15
3.1.9 EMV-Grundnorm [DIN EN 61000-4-11]	15
3.1.10 Fehlfunktion [DIN EN 61000-4-11]	15
3.1.11 Kunde [IEV 604-01-03]	15
3.1.12 Kundenanlage [VDE-AR-N 4101]	15
3.1.13 Kurzschlussleistung [IEV 601-01-14]	16
3.1.14 Kurzzeitunterbrechung [DIN EN 61000-4-11]	16
3.1.15 Kurzzeitige Unterbrechung [IEV 191-26-02]	16
3.1.16 Kurzzeitunterbrechung (der Versorgungsspannung) [IEV 161-08-20]	16
3.1.17 Nennspannung eines Netzes [IEV 601-01-21]	16
3.1.18 Netzbetreiber [VDE-AR-N 4105]	16
3.1.19 Netznutzer [DIN EN 50160]	16
3.1.20 Restspannung [DIN EN 61000-4-34]	16
3.1.21 Spannungsänderung (langsame) [DIN EN 50160]	17
3.1.22 Spannungsänderung (schnelle) [DIN EN 50160]	17
3.1.23 Spannungseinbruch [IEV 161-08-10]	17
3.1.24 Spannungsqualität [IEV 617-01-05]	17
3.1.25 Spannungsschwankung [DIN EN 61000-4-11]	17
3.1.26 Störaussendung [IEV 161-01-08]	17
3.1.27 Störfestigkeit (gegenüber einer Störgröße) [IEV 161-01-20]	17
3.1.28 Übergabestelle [IEV 604-01-04]	17
3.1.29 vereinbarte Versorgungsspannung [DIN EN 50160]	18
3.1.30 Verknüpfungspunkt [IEV 161-07-15]	18
3.1.31 Versorgungsnetzimpedanz [IEV 161-07-16]	18
3.1.32 Versorgungsspannung [IEV 604-01-16]	18
3.1.33 Versorgungsunterbrechung [IEV 603-05-11]	18
3.1.34 Versorgungsunterbrechung [DIN EN 50160]	18
3.1.35 Versorgungszuverlässigkeit [IEV 603-05-02]	19
3.1.36 Wiedereinschaltautomatik (AWE) / Kurzunterbrechungseinrichtung (KU) [IEV 448-16-02]	19

3.2	Abkürzungen.....	20
4	Rahmenbedingungen und Grundlagen: Elektromagnetische Verträglichkeit in der Normung.....	21
4.1	Einordnung und Begrifflichkeiten.....	21
4.1.1	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV).....	21
4.1.2	Netzurückwirkungen.....	24
4.1.3	Versorgungsqualität.....	25
4.2	Normen und technische Regelwerke.....	26
4.2.1	Verhältnis der Gesetze zu Normen und technischen Regelwerken.....	26
4.2.2	Normenreihe IEC 61000-x-y.....	27
4.2.3	DIN EN 50160.....	28
4.2.4	Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen (D-A-CH-CZ).....	28
4.2.5	VDE-Anwendungsregeln.....	29
4.2.6	Aussagen zu Spannungseinbrüchen in Normen und Regelwerken.....	29
5	Entstehung von Spannungseinbrüchen.....	35
5.1	Spannungseinbrüche durch nicht planbare Ereignisse.....	36
5.2	Spannungseinbrüche durch deterministische Ereignisse.....	38
5.3	Historische Entwicklung der Spannungseinbrüche.....	39
6	Systemanalyse auf der Kundenseite.....	41
6.1	Prozessbeschreibung.....	41
6.2	Planungsansätze.....	41
6.3	Überprüfung in bestehenden Kundenanlagen.....	41
6.4	Dokumentation der Störung und seinem Umfeld.....	42
6.5	Qualitätssicherung.....	43
7	Mögliche Abhilfe-Maßnahmen in öffentlichen Netzen, Kundenanlagen und Kundennetzen.....	44
7.1	Durch Schaltung bzw. große Leistungsänderungen von Kundenanlagen verursachte Spannungseinbrüche.....	44
7.2	Durch Netzstörungen verursachte Spannungseinbrüche.....	45
7.3	Auslegung des Netzschutzes.....	46
7.3.1	Schutzgeräte für elektrische Netze.....	47
7.3.2	Blitzschutz.....	48
7.4	Mögliche Abhilfe-Maßnahmen in der Kundenanlage.....	48
7.4.1	Spezifische Abhilfe-Maßnahmen in der Kundenanlage.....	49
7.4.2	Maßnahmen gegen Spannungseinbrüche.....	49
7.4.3	Prozessoptimierung.....	49
7.4.4	Bilaterale Vereinbarungen.....	50
8	Zusammenfassung.....	51
	Literaturverzeichnis.....	53
	Anhang A: Beispiele für die Kundenseite.....	54
A1	Produktionsbetrieb mit hohem Automatisierungsgrad.....	54
A2	Auslösungen des kundeneigenen Leistungsschalters.....	54

A3	Totalausfall der Bürokommunikation	55
A4	Netzurückwirkungen im restlichen Netz	55
Anhang B: Beispiele für die Netzseite		57

Bildverzeichnis

Bild 1:	Wechselwirkung zwischen Störaussendung und –festigkeit als Randbedingung der elektromagnetischen Verträglichkeit [3]	22
Bild 2:	Wahrung des ökonomischen Optimums unter der Nebenbedingung: Störfestigkeit > Störaussendung	23
Bild 3:	Bereiche der Versorgungsqualität in der elektrischen Energieversorgung	26
Bild 4:	Gerätebezogene Störfestigkeitskurven verschiedener Normen.....	34
Bild 5:	Auswirkung eines Kurzschlusses in einer unterlagerten Netzebene auf die übergeordnete Netzebene (alle Spannungen bezogen auf jeweilige Nennspannung)	35
Bild 6:	Darstellung eines Fehlers in einem benachbarten (galvanisch verbundenen) Netz/Strang.....	37
Bild 7:	Zeitliche Entwicklung der auf die Stromkreislänge bezogenen kurzschlussartigen Fehler aus der FNN-Störungsstatistik (als Richtgröße für aufgetretene Spannungseinbrüche)	40
Bild 8:	Wichtige Gesichtspunkte bei der Dokumentation von Störungen	42
Bild 9:	Entkopplung von Störquelle und Störsenke	45
Bild 10:	Typisches MS-Netz mit verschiedenen möglichen Fehlerstellen.....	58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Matrix Produktnormen (product standards).....	28
Tabelle 2: Matrix Fachgrundnorm (generic standards)	28
Tabelle 3: Störfestigkeitspegel zur Prüfung gegenüber Spannungseinbrüchen nach ausgewählten Normen.....	31
Tabelle 4: Störfestigkeitspegel zur Prüfung gegenüber Spannungsunterbrechungen nach ausgewählten Normen.....	32
Tabelle 5: Funktionsfähigkeitskriterien zur Bewertung bei Störfestigkeitsprüfungen gegenüber Spannungseinbrüchen und –unterbrechungen nach ausgewählten Normen	33
Tabelle 6: EMV-Umgebungsklassen zur Anwendung bei Störfestigkeitsprüfungen gegenüber Spannungseinbrüchen und -unterbrechungen gemäß DIN EN 61000-2-4:2002.....	33
Tabelle 7: Dauer eines Spannungseinbruchs durch übliche Fehlerklärungszeiten (1), (2)	37
Tabelle 8: Mögliche Abhilfe-Maßnahmen bei verschiedenen Unterbrechungsdauern	49
Tabelle 9: Produktionsbetrieb mit hohem Automatisierungsgrad: Gegenüberstellung der Situationen vor und nach der Umsetzung geeigneter Abhilfe-Maßnahmen zur Vermeidung von Produktionsausfällen.....	54
Tabelle 10:Auslösungen des kundeneigenen Leistungsschalters: Gegenüberstellung der Situationen vor und nach der Umsetzung geeigneter Abhilfe-Maßnahmen zur Vermeidung von Auslösungen des kundeneigenen Leistungsschalters	55
Tabelle 11:Totalausfall der Bürokommunikation: Gegenüberstellung der Situationen vor und nach der Umsetzung geeigneter Abhilfe-Maßnahmen zur Begrenzung des Anlaufstroms eines Krans	55
Tabelle 12:Netzurückwirkungen im restlichen Netz: Gegenüberstellung der Situationen vor und nach der Umsetzung geeigneter Abhilfe-Maßnahmen zur Begrenzung der Netzurückwirkungen	56

Vorwort

In der Wahrnehmung einiger Kunden treten gegenüber früher heute zunehmend Funktionsstörungen bei den eingesetzten Geräten bzw. Prozessen durch Spannungseinbrüche auf [1]. Demgegenüber steht die Tatsache, dass gemäß der FNN-Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik [2] keine Zunahme der Ereignisse, die zu Spannungseinbrüchen führen, feststellbar ist.

Wesentliche Ursache für die heutige Wahrnehmung ist die empfindlichere Reaktion von Geräten auf Spannungseinbrüche durch die deutlich veränderte Gerätetechnik (Reduktion interner Energiespeicher). So wird in zunehmendem Maße die früher relativ unempfindliche direkte elektrothermische bzw. elektromechanische Energieumwandlung durch empfindlichere zusätzliche elektronische Strom-/Spannungsumwandlung (Umrichter) ersetzt und um elektronische Steuerungsgeräte ergänzt.

Die möglichen Gründe für die geänderte Wahrnehmung der Auswirkungen von Spannungseinbrüchen werden näher untersucht.

Die Projektgruppe „Störfestigkeit im Zusammenspiel von Kundenanlagen und Elektrizitätsnetzen“ des Forums Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN) hat den vorliegenden FNN-Hinweis erarbeitet.

Einleitung

Der FNN-Hinweis behandelt die zentrale Frage: Wie kann mit Blick auf Spannungseinbrüche und (technisch bedingten) Kurzunterbrechungen mit ähnlicher Wirkung durch eine intelligente Koordination von Maßnahmen ein störungsfreier Betrieb von (hoch-)empfindlichen Produktionsprozessen dauerhaft und wirtschaftlich erreicht werden?

Vor diesem Hintergrund werden die Einflussgrößen auf die Häufigkeit und Ausprägung von Spannungseinbrüchen beleuchtet, technische/betriebliche Erläuterungen gegeben und mögliche Abhilfemaßnahmen genannt.

Die Unterlage fördert das Verständnis und ermöglicht eine aktive Mitwirkung bei der Ermittlung geeigneter technischer Lösungen für die Stromversorgung eines spezifischen Prozesses.

Ausgehend von der Entstehung von Spannungseinbrüchen wird das Vorgehen für eine Systemanalyse auf der Kundenseite betrachtet.

Aufbau des FNN-Hinweises

Das vorliegende Dokument beschreibt im Kapitel 1 den Anwendungsbereich und listet in Kapitel 2 die normativen Verweisungen auf. Im Kapitel 3 werden zwecks unmissverständlicher Verwendung des im vorliegenden Dokument benutzten Vokabulars Begriffe und Abkürzungen gemäß dem Internationalen Elektrotechnischen Wörterbuch (IEV) und den in der Thematik gewöhnlich angewandten EN-Normen und Technischen Anschlussregeln definiert. Zunächst erfolgt im Kapitel 4 eine zum Verständnis der Problematik notwendige Einführung in die Elektromagnetische Verträglichkeit. Die Entstehung von Spannungseinbrüchen wird im Kapitel 5 analysiert. Ferner folgt im Kapitel 6 eine ausführliche Systemanalyse aus Sicht der Kunden. Die Möglichkeiten aus Netzbetreibersicht werden abschließend im Kapitel 7 aufgezeigt.

1 Anwendungsbereich

Dieser FNN-Hinweis richtet sich an Gewerbe- und Industriekunden sowie Netzbetreiber der (in der Regel allgemeinen) elektrischen Energieversorgung jeweils in den NS- und MS-Verteilnetzen mit Netznennspannungen unter 110 kV. Es wird insbesondere die Schnittstelle Netz-Kundenanlage betrachtet. In der Niederspannung endet damit der Betrachtungsbereich z.B. am Hausanschlusskasten.

Es wird der Spannungsqualitätsaspekt kurzzeitiger Spannungseinbruch betrachtet, wie er im Netzbetrieb, z.B. durch Störungen oder Schaltmaßnahmen, auftreten kann. Bei Spannungseinbrüchen kommt es zur kurzzeitigen Reduktion der Spannung auf Werte unter 90 % bis minimal 5 % der Nennspannung. Weiterhin wird der vom Spannungseinbruch betroffene Netzknoten nicht durch Schutzauslösungen spannungslos geschaltet.

Aspekte der Versorgungszuverlässigkeit, d.h. das Auftreten von vollständigen Versorgungsunterbrechungen (mit Absinken der Restspannung unter 5 % der Nennspannung), werden nicht behandelt.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente berühren die Thematik dieses FNN-Hinweises und sind daher gegebenenfalls bei Anwendung des FNN-Hinweises zu berücksichtigen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz

VDE-AR-N 4120 Technische Bedingungen für den Anschluss und Betrieb von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz (TAB Hochspannung)

DIN EN 50160, „Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen; Deutsche Fassung DIN EN 50160:2010 + Cor.:2010

DIN EN 55024 (VDE 0878-24), Einrichtungen der Informationstechnik – Störfestigkeitseigenschaften – Grenzwerte und Prüfverfahren (CISPR 24:2010 + Cor.:2011 + A1:2015); Deutsche Fassung EN 55024:2010 + A1:2015

DIN EN 61000-2-4 (VDE 0839 Teil 2-4), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 2-4: Umgebungsbedingungen – Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen in Industrieanlagen (IEC 61000-2-4:2002); Deutsche Fassung EN 61000-2-4:2002

DIN EN 61000-3-2 (VDE 0838-2), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 3-2: Grenzwerte – Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter) (IEC 61000-3-2:2014); Deutsche Fassung EN 61000-3-2:2014

DIN EN 61000-3-3 (VDE 0838-3), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 3-3: Grenzwerte – Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker in öffentlichen Niederspannungs-Versorgungsnetzen für Geräte mit einem Bemessungsstrom ≤ 16 A je Leiter, die keiner Sonderanschlussbedingung unterliegen (IEC 61000-3-3:2013); Deutsche Fassung EN 61000-3-3:2013

DIN EN 61000-3-11 (VDE 0838-11), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 3-11: Grenzwerte; Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker in öffentlichen Niederspannungs-Versorgungsnetzen – Geräte und Einrichtungen mit einem Bemessungsstrom ≤ 75 A, die einer Sonderanschlussbedingung unterliegen (IEC 61000-3-11:2000); Deutsche Fassung EN 61000-3-11:2000

DIN EN 61000-3-12 (VDE 0838-12), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 3-12: Grenzwerte – Grenzwerte für Oberschwingungsströme, verursacht von Geräten und Einrichtungen mit einem Eingangsstrom > 16 A und ≤ 75 A je Leiter, die zum Anschluss an öffentliche Niederspannungsnetze vorgesehen sind (IEC 61000-3-12:2011); Deutsche Fassung EN 61000-3-12:2011

DIN EN 61000-3-12 Beiblatt 1 (VDE 0838-12 Beiblatt 1), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 3-12: Grenzwerte – Grenzwerte für Oberschwingungsströme, verursacht von Geräten und Einrichtungen mit einem Eingangsstrom > 16 A und ≤ 75 A je Leiter, die zum Anschluss an öffentliche Niederspannungsnetze vorgesehen sind; Beiblatt 1: Auslegungsblatt 1 (IEC 61000-3-12:2011/ISH1:2012)

DIN EN 61000-4-7 (VDE 0847-4-7), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-7: Prüf- und Messverfahren – Allgemeiner Leitfadens für Verfahren und Geräte zur Messung von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen in Stromversorgungsnetzen und angeschlossenen Geräten (IEC 61000-4-7:2002 + A1:2008); Deutsche Fassung EN 61000-4-7:2002 + A1:2009

DIN EN 61000-4-11 (VDE 0847 Teil 4-11), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-11: Prüf- und Messverfahren – Prüfungen der Störfestigkeit gegen Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen (IEC 61000-4-11:2004); Deutsche Fassung EN 61000-4-11:2004

DIN EN 61000-4-30 (VDE 0847-4-30), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-30: Prüf- und Messverfahren – Verfahren zur Messung der Spannungsqualität (IEC 61000-4-30:2015); Deutsche Fassung EN 61000-4-30:2015

DIN EN 61000-4-34 (VDE 0847-4-34), Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-34: Prüf- und Messverfahren – Prüfungen der Störfestigkeit von Geräten und Einrichtungen mit einem Netzstrom > 16 A je Leiter gegen Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen (IEC 61000-4-34:2005 + A1:2009 + Cor.:2009); Deutsche Fassung EN 61000-4-34:2007 + A1:2009

DIN EN 61000-6-1 (VDE 0839-6-1) Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 6-1: Fachgrundnormen – Störfestigkeit für Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe (IEC 61000-6-1:2005); Deutsche Fassung EN 61000-6-1:2007

DIN EN 61000-6-2 (VDE 0839-6-2) Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 6-2: Fachgrundnormen – Störfestigkeit für Industriebereiche (IEC 61000-6-2:2005); Deutsche Fassung EN 61000-6-2:2005

DIN EN 61000-6-2 Berichtigung 1 (VDE 0839-6-2 Berichtigung 1) Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 6-2: Fachgrundnormen – Störfestigkeit für Industriebereiche (IEC 61000-6-2:2005); Deutsche Fassung EN 61000-6-2:2005, Berichtigung zu DIN EN 61000-6-2 (VDE 0839-6-2):2006-03; Deutsche Fassung CENELEC-Cor.:2005 zu EN 61000-6-2:2005

IEC/TR 61000-2-8:2002-11: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-8: Environment - Voltage dips and short interruptions on public electric power supply systems with statistical measurement results

3 Begriffe und Abkürzungen

3.1 Begriffe

3.1.1 Anlagenbetreiber

im Sinne dieser Unterlage Unternehmer oder eine von ihm beauftragte natürliche oder juristische Person, die die Unternehmerpflicht für den sicheren Betrieb und ordnungsgemäßen Zustand der Kundenanlage wahrnimmt

3.1.2 Anschlussnutzer [VDE-AR-N 4101]

Letztverbraucher oder Erzeugungsanlagenbetreiber, die im Rahmen eines Anschlussnutzungsverhältnisses einen Anschluss an das Niederspannungsnetz zur Entnahme oder Einspeisung von Elektrizität nutzen

3.1.3 Betriebsspannung [IEV 601-01-22]

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

ANMERKUNG: Hierbei kann es sich um einen erwarteten, geschätzten oder gemessenen Wert handeln.

3.1.4 Bezugsspannung (für die Ermittlung von Spannungsunterbrechungen, -einbrüchen und -überhöhungen) [DIN EN 50160]

als Grundlage festgelegter Wert, auf den die Restspannung, Schwellen und andere Werte als Wert je Einheit oder als Prozentwert ausgedrückt werden

ANMERKUNG: Für die Anwendung dieser Norm ist die Bezugsspannung die Nenn- oder vereinbarte Spannung des Versorgungsnetzes.

3.1.5 Dauer eines Spannungseinbruchs [DIN EN 50160]

Zeit zwischen dem Augenblick, in dem die Spannung unter die Anfangseinbruchschwelle an einem bestimmten Punkt des Elektrizitätsversorgungsnetzes fällt, und dem Augenblick, in dem sie auf die Endeinbruchschwelle ansteigt. Für die Anwendung dieser Norm reicht die Dauer eines Spannungseinbruchs von 10 ms bis einschließlich 1 min

ANMERKUNG: Bei mehrphasigen Ereignissen beginnt ein Einbruch, wenn die Spannung von wenigstens einer Phase unter die Anfangseinbruchschwelle fällt, und endet er, wenn die Spannung sämtlicher Phasen gleich der oder höher als die Endeinbruchschwelle ist.

3.1.6 Elektrizitätsversorgungsqualität [IEV 617-01-07]

gemeinsame Wirkung aller Leistungsparameter der Versorgung mit elektrischer Energie

ANMERKUNG: Die Versorgungsqualität umfasst die Sicherheit der Elektrizitätsversorgung als Grundvoraussetzung, Zuverlässigkeit des Elektrizitätsversorgungssystems, Spannungsqualität und Kundenbeziehungen.

3.1.7 Elektromagnetische Verträglichkeit [IEV 161-01-07]

Fähigkeit einer Einrichtung oder eines Systems, in ihrer/seiner elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu funktionieren, ohne in diese Umgebung, zu der auch andere Einrichtungen gehören, unzulässige elektromagnetische Störgrößen einzubringen

ANMERKUNG (aus [4]): EMV und Spannungsqualität sind voneinander abhängig. Für die EMV sind die Richtlinie 89/336/EWG bzw. 2004/108/EC der EU und die in deren Rahmen publizierten Emissionsgrenzwert- und Störfestigkeitsanforderungs-Normen maßgebend.

Die Spannungsqualität in Nieder- und Mittelspannungsnetzen wird im Wesentlichen in der DIN EN 50160 des CENELEC beschrieben.

3.1.8 Elektromagnetischer Verträglichkeitspegel [IEV 161-03-10]

festgelegter elektromagnetischer Störpegel, der als Bezugspegel zur Koordination bei der Festlegung von Aussendungs- und Störfestigkeitsgrenzwerten verwendet wird

ANMERKUNG 1: Der Verträglichkeitspegel wird nach Übereinkunft so gewählt, dass er von dem tatsächlichen Störpegel nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit überschritten wird. Elektromagnetische Verträglichkeit wird jedoch nur erreicht, wenn die Störaussendungs- und Störfestigkeitspegel in einer Weise beherrscht werden, dass an jedem Ort der Störpegel aus der Summe der sich überlagernden Störaussendungen kleiner als der Störfestigkeitspegel für jedes Gerät, jede Ausrüstung oder jedes System am gleichen Ort ist.

ANMERKUNG 2: Der Verträglichkeitspegel kann ercheinungs-, zeit- oder ortsabhängig sein.

3.1.9 EMV-Grundnorm [DIN EN 61000-4-11]

Normen mit der Angabe allgemeiner und grundsätzlicher Bedingungen oder Regeln zur Erreichung der EMV, die sich auf alle Produkte und Systeme beziehen oder dafür gelten und den Produktkomitees als Bezugsschriftstück dienen

ANMERKUNG: Wie durch das „Advisory Committee on Electromagnetic Compatibility (ACEC)“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) festgelegt – siehe IEC-Leitfaden 107.

3.1.10 Fehlfunktion [DIN EN 61000-4-11]

Beendigung der Fähigkeit eines Gerätes (einer Einrichtung), vorgesehene Funktionen auszuführen, oder die Ausführung von nicht vorgesehenen Funktionen durch dieses Gerät (diese Einrichtungen)

3.1.11 Kunde [IEV 604-01-03]

Abnehmer elektrischer Energie, der über ein Netz, im Allgemeinen ein Verteilungsnetz, versorgt wird

3.1.12 Kundenanlage [VDE-AR-N 4101]

die Gesamtheit der elektrischen Betriebsmittel nach der jeweiligen Messeinrichtung, die Bestandteil der elektrischen Anlage ist und einem Anschlussnutzer zur Entnahme oder Einspeisung von Energie aus dem Netz bzw. in das Netz dient

3.1.13 Kurzschlussleistung [IEV 601-01-14]

Produkt aus dreipoligem Kurzschlussstrom an einer Stelle des Netzes mal eine vereinbarte Spannung, im Allgemeinen die Betriebsspannung

3.1.14 Kurzzeitunterbrechung [DIN EN 61000-4-11]

Plötzliches Absinken der Spannung unter eine festgelegte Schwelle in allen Leitern an einem bestimmten Punkt des elektrischen Versorgungsnetzes, dem eine Wiederherstellung der Spannung nach einem kurzen Zeitabschnitt folgt

ANMERKUNG: Kurzzeitunterbrechungen sind typischerweise mit Schalthandlungen von Schaltgeräten im Zusammenhang mit dem Auftreten und der Beendigung von Kurzschlüssen im Netz oder der Installation (Anlagen), die an das Netz angeschlossen sind, verbunden.

3.1.15 Kurzzeitige Unterbrechung [IEV 191-26-02]

Kurzzeitige Unterbrechung (momentary interruption): Unterbrechung der Elektrizitätsversorgung, bei der die Wiederherstellung der Versorgung innerhalb einer festgelegten Dauer erfolgt

ANMERKUNG: Im Allgemeinen beträgt die festgelegte Dauer fünf Minuten oder weniger.

3.1.16 Kurzzeitunterbrechung (der Versorgungsspannung) [IEV 161-08-20]

Kurzzeitunterbrechung (short interruption of supply voltage): Wegbleiben der Spannung während eines Zeitintervalls, dessen Dauer zwischen zwei festgelegten Werten liegt

ANMERKUNG: Als eine Kurzzeitunterbrechung wird die Verringerung der Versorgungsspannung auf weniger als 1 % der Nennspannung betrachtet. Dabei liegt der untere Grenzwert der Dauer typischerweise bei wenigen Zehnteln einer Sekunde und der obere Grenzwert in der Größenordnung von einer Minute (oder, in einigen Fällen, von bis zu drei Minuten).

3.1.17 Nennspannung eines Netzes [IEV 601-01-21]

geeigneter, gerundeter Spannungswert zur Bezeichnung oder Identifizierung eines Netzes

3.1.18 Netzbetreiber [VDE-AR-N 4105]

Betreiber eines Netzes der allgemeinen Versorgung für elektrische Energie

3.1.19 Netznutzer [DIN EN 50160]

Partei, die von einem Elektrizitätsversorgungsnetz Energie bezieht oder Energie in das Elektrizitätsversorgungsnetz liefert

ANMERKUNG: In mehreren Ländern schließt der Begriff Netznutzer Netzbetreiber ein, die mit dem Versorgungsnetz mit dem gleichen oder einem höheren Spannungswert verbunden sind.

3.1.20 Restspannung [DIN EN 61000-4-34]

Kleinster Wert des Spannungseffektivwertes, der während eines Spannungseinbruchs oder einer Kurzzeitunterbrechung festgehalten wird

ANMERKUNG: Die Restspannung kann als ein Wert in V oder als Prozentwert einer Bezugsspannung oder Wert je Einheit der Bezugsspannung ausgedrückt werden.

3.1.21 Spannungsänderung (langsame) [DIN EN 50160]

eine Erhöhung oder Abnahme der Spannung, üblicherweise aufgrund von Laständerungen

3.1.22 Spannungsänderung (schnelle) [DIN EN 50160]

eine einzelne schnelle Änderung des Effektivwertes einer Spannung zwischen zwei aufeinander folgenden Spannungswerten mit jeweils bestimmter, aber nicht festgelegter Dauer (für mehr Informationen siehe EN 61000-3-3)

3.1.23 Spannungseinbruch [IEV 161-08-10]

plötzliches Absinken der Spannung an einem Punkt des elektrischen Netzes, dem eine Wiederherstellung der Spannung nach einem kurzen Zeitabschnitt von wenigen Periodendauern bis wenigen Sekunden folgt

ANMERKUNG 1 (aus DIN EN 50160): Für die Anwendung dieser Norm ist die Anfangseinbruchschwelle gleich 90 % der Bezugsspannung.

ANMERKUNG 2 (aus DIN EN 50160): Ein Einbruch ist typischerweise mit dem Auftreten und der Beendigung eines Kurzschlusses oder einem anderen extremen Stromanstieg im Netz oder in Installationen (Anlagen), die an das Netz angeschlossen sind, verbunden.

ANMERKUNG 3 (aus DIN EN 50160): Für die Anwendung dieser Norm stellt ein Spannungseinbruch eine zweidimensionale elektromagnetische Störgröße dar. Seine Größe wird sowohl durch die Spannung als auch durch die Zeit (Dauer) bestimmt.

3.1.24 Spannungsqualität [IEV 617-01-05]

Eigenschaften von Stromstärke, Spannung und Frequenz an einem gegebenen Punkt in einem Elektrizitätsversorgungssystem, bewertet nach einem Satz von technischen Bezugsparametern

ANMERKUNG: Diese Parameter können sich in einigen Fällen auf die Verträglichkeit zwischen der in ein Elektrizitätsversorgungssystem eingespeisten elektrischen Energie und den mit dem Elektrizitätsversorgungssystem verbundenen Lasten beziehen.

3.1.25 Spannungsschwankung [DIN EN 61000-4-11]

Allmähliche Änderung der Versorgungsspannung auf einem höheren oder niedrigeren Wert gegenüber der Bemessungsspannung. Die Dauer der Änderung kann kurz oder lang sein.

3.1.26 Störaussendung [IEV 161-01-08]

elektromagnetische Aussendung – Erscheinung, bei der elektromagnetische Energie aus einer Quelle austritt

3.1.27 Störfestigkeit (gegenüber einer Störgröße) [IEV 161-01-20]

Fähigkeit eines Geräts, einer Ausrüstung oder eines Systems, in Gegenwart einer elektromagnetischen Störgröße ohne Beeinträchtigung der Funktion zu funktionieren

3.1.28 Übergabestelle [IEV 604-01-04]

Netzpunkt, für den die technischen und wirtschaftlichen Bedingungen einer Lieferung elektrischer Energie festgelegt sind

ANMERKUNG: Die Übergabestelle muss weder mit der Eigentumsgrenze zwischen dem Netz des Elektrizitätsversorgungsunternehmens und den Kundenanlagen noch mit der Messstelle identisch sein.

3.1.29 vereinbarte Versorgungsspannung [DIN EN 50160]

zwischen dem Netzbetreiber und dem Netznutzer vereinbarte Versorgungsspannung

ANMERKUNG: Im Normalbetrieb ist die vereinbarte Versorgungsspannung gleich der Nennspannung des Verteilnetzes, aber sie kann von der Nennspannung abweichen, wenn eine entsprechende Vereinbarung zwischen dem Netzbetreiber und dem Netznutzer besteht.

3.1.30 Verknüpfungspunkt [IEV 161-07-15]

Punkt in einem öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetz, der elektrisch einem speziellen Verbraucher am nächsten liegt und an den andere Verbraucher angeschlossen sind oder sein können

ANMERKUNG 1: Diese Verbraucher können entweder Geräte, Einrichtungen oder Systeme oder bestimmte Anlagen beim Kunden sein.

ANMERKUNG2: Netzanschlusspunkt (Netzpunkt), an dem die Kundenanlage an das Netz des Netzbetreibers angeschlossen ist. Der Netzanschlusspunkt hat vor allem Bedeutung im Zusammenhang mit der Netzplanung. Eine Unterscheidung zwischen Netzanschlusspunkt und Verknüpfungspunkt ist nicht in allen Fällen erforderlich.

3.1.31 Versorgungsnetzimpedanz [IEV 161-07-16]

Impedanz des Versorgungsnetzes, wie sie vom Verknüpfungspunkt aus gesehen wird

3.1.32 Versorgungsspannung [IEV 604-01-16]

Spannungswert, den das Elektrizitätsversorgungsunternehmen an der Übergabestelle hält

ANMERKUNG: Ist die Versorgungsspannung ausdrücklich angegeben, zum Beispiel im Liefervertrag, so wird sie Vertragsspannung genannt.

3.1.33 Versorgungsunterbrechung [IEV 603-05-11]

Aussetzen der Energielieferung an einen oder mehrere Kunden

3.1.34 Versorgungsunterbrechung [DIN EN 50160]

Zustand, in dem die Spannung an der Übergabestelle weniger als 5 % der Bezugsspannung beträgt

ANMERKUNG 1: Versorgungsunterbrechungen lassen sich einteilen in:

- geplante Versorgungsunterbrechungen, über die die Netznutzer im Voraus benachrichtigt werden, oder,
- zufällige Versorgungsunterbrechungen, die durch andauernde oder vorübergehende Störungen verursacht werden. Sie treten meist in Zusammenhang mit äußeren Einflüssen, Anlagenausfällen oder anderen Störungen auf. Zufällige Versorgungsunterbrechungen werden eingeteilt in:
 - Langzeitunterbrechungen (länger als 3 min);

- Kurzzeitunterbrechungen (bis einschließlich 3 min).

ANMERKUNG 2: Versorgungsunterbrechungen werden üblicherweise durch das Betätigen von Schaltern oder durch den Betrieb von Schutzgeräten verursacht.

ANMERKUNG 3: Die Auswirkungen einer geplanten Versorgungsunterbrechung können von den Netznutzern durch geeignete Maßnahmen auf ein Minimum reduziert werden.

ANMERKUNG 4: Geplante Versorgungsunterbrechungen treten typischerweise aufgrund von regulären Arbeiten im Elektrizitätsversorgungsnetz auf.

ANMERKUNG 5: Zufällige Versorgungsunterbrechungen sind unvorhersehbare, weitgehend stochastische Ereignisse.

ANMERKUNG 6: Bei mehrphasigen Netzen tritt eine Unterbrechung auf, wenn die Spannung in allen Phasen unterhalb 5 % der Bezugsspannung fällt (anderenfalls handelt es sich um einen Spannungseinbruch).

ANMERKUNG 7: In manchen Ländern wird der Begriff „sehr kurze Versorgungsunterbrechung (SKU)“ oder „vorübergehende Versorgungsunterbrechung“ verwendet, um Versorgungsunterbrechungen, deren Dauer kürzer als 1 s bis 5 s ist, zu klassifizieren. Solche Versorgungsunterbrechungen sind auf den Betrieb von Geräten zum automatischen Wiederschließen zurückzuführen.

3.1.35 Versorgungszuverlässigkeit [IEV 603-05-02]

Fähigkeit eines Elektrizitätsversorgungssystems, seine Versorgungsaufgabe unter vorgegebenen Bedingungen während eines festgelegten Zeitintervalls zu erfüllen

3.1.36 Wiedereinschaltautomatik (AWE) / Kurzunterbrechungseinrichtung (KU) [IEV 448-16-02]

Automatik, die die Wiedereinschaltung eines Leistungsschalters nach seiner Auslösung durch den Selektivschutz veranlasst (AWE – automatische Wiedereinschaltung; KU - Kurzunterbrechung)

ANMERKUNG: Wenn die Unterbrechungsdauer von Interesse ist, sollte sie zusätzlich angegeben werden. Folglich kann die Wiedereinschaltautomatik entsprechend dem Anwendungsfall als schnell, langsam oder verzögert beschrieben werden.

Ergänzende ANMERKUNG: von einer automatischen Einrichtung gesteuerte Wiedereinschaltung des einem fehlerbehafteten Teil des Netzes zugeordneten Leistungsschalters, mit der Erwartung, dass der Fehler während der Unterbrechungszeit verschwindet. Diese Funktionalität wurde früher auch als KU (für Kurzunterbrechung) bezeichnet. Die Umbenennung wurde durchgeführt um die Abgrenzung zur Versorgungsunterbrechung im Sinne der Versorgungszuverlässigkeit zu verdeutlichen. Bei der AWE handelt es sich um ein Phänomen der Spannungsqualität, bei deren Auswirkung um einen Spannungseinbruch.

3.2 Abkürzungen

AWE	automatische Wiedereinschaltung
CBEMA	Computer Business Equipment Manufacturers Association
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ESD	Electrostatic Discharge (elektrostatische Entladung)
EUT	Equipment Under Test (Prüfling – zu prüfendes Objekt)
FFT	Fast Fourier Transform (schnelle Fourier-Transformation)
FNN	Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE
HöS	Höchstspannung
HS	Hochspannung
IEC	International Electrotechnical Commission
ISM	Industrial, Scientific and Medical (industrielle, wissenschaftliche und medizinische Geräte)
ITE	Information Technology Equipment (informationstechnische Einrichtungen)
ITI	Information Technology Industry
ITIC	Information Technology Industry Council
KNOSPE	kurzzeitig niederohmige Sternpunktterdung
KU	Kurzunterbrechung
MS	Mittelspannung
NOSPE	niederohmige Sternpunktterdung
NS	Niederspannung
ONS	Ortsnetzstation
RESPE	Resonanzsternpunktterdung
SEMI	Semiconductor Equipment and Materials International (internationaler Branchenverband führender Halbleiterhersteller)
TAB	Technische Anschlussbedingungen
TAR	Technische Anschlussregel
TCF	Technical Construction Files
TEM-Zelle	Transverse Electromagnetic Mode-Cell – a transverse mode in electromagnetic transmission (transversale elektromagnetische Fortleitung)
UMZ	unabhängiger Maximalstromzeitschutz

4 Rahmenbedingungen und Grundlagen: Elektromagnetische Verträglichkeit in der Normung

4.1 Einordnung und Begrifflichkeiten

Wie kann durch eine intelligente Koordination von Maßnahmen zur Beherrschung von Einflussgrößen ein störungsfreier Produktionsprozess dauerhaft erreicht werden? Diese zentrale Fragestellung beschreibt die Problemstellung des zu lösenden Konfliktes zwischen Einflussgrößen (physikalischen Phänomenen) und einem Prozess mit gewisser Sensitivität gegenüber diesen Einflussgrößen, unter Gewährleistung einer Basis-Qualität. Hierunter ist eine zu definierende angemessene Qualität unter Berücksichtigung eines Gesamtkonzeptes zu verstehen. Genau das versucht das Fachgebiet der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) strukturiert zu beantworten.

Zunächst ist eine Einordnung der Begrifflichkeiten und Definitionen zwingend notwendig, um Überschneidungen, Abgrenzungen und den gemeinverständlichen Gebrauch im Vokabular sicherzustellen und eine missverständliche Diskussion bei Betroffenen auszuschließen.

4.1.1 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Die allgemeine Forderung der elektromagnetischen Verträglichkeit ist in Bild 1 grafisch dargestellt. Sie gilt nicht nur für die Geräte, sondern sinngemäß auch für das Netz und seine Betriebsmittel. In der EMV kann vereinfacht der Wirkungsmechanismus auf ein Quelle-Kopplung-Senke-Modell reduziert werden. Alle elektrischen Betriebsmittel können als Quelle und Senke fungieren. Der Übertragungsweg der physikalischen Größen Strom, Spannung und Strahlung zwischen Quelle und Senke erfolgt per galvanischer (Impedanz), kapazitiver (elektrisches Feld) und induktiver (magnetisches Feld) Kopplung oder per Strahlung (elektromagnetisches Feld). In der Praxis erfolgt dies niemals zu 100% auf einem Kopplungsweg, sondern in einer Mischform aller vier theoretischen Koppelmechanismen. In Bild 1 sendet jede Komponente Störungen aus, die die eigene Störfestigkeit und die anderer Geräte beanspruchen. Im Falle des Netzes gilt die Besonderheit, dass eine Störaussendung direkt auf die eigene Störfestigkeit wirkt, da sich über das Netz alle Störaussendungen ausbreiten und dabei sowohl geschwächt als verstärkt werden können.

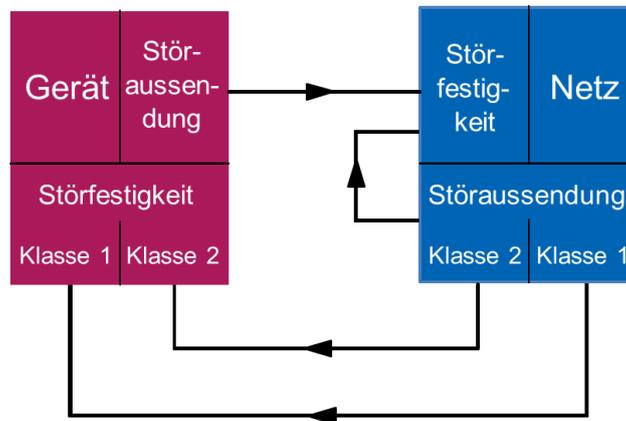


Bild 1: Wechselwirkung zwischen Störaussendung und -festigkeit als Randbedingung der elektromagnetischen Verträglichkeit [3]

Die physikalischen Größen, die ggf. zu Störungen der Funktion führen, lassen sich in verschiedene Phänomene klassifizieren:

- Elektrostatische Entladungen (ESD-Generator)
- Burst (Pakete von Exponentialpulsen, energiearm)
- Surge (einzelne Exponentialpulse, energiereich)
- Funkspannung (modelliert, def. Frequenzbereiche)
- Funkstrahlung (modelliert, def. Frequenzbereiche)
- Dips und Interrupts
- Harmonics, Interharmonics
- Flicker.

Um die Güte der EMV zu beschreiben, respektive deren Beherrschung zu quantifizieren werden auf der Seite der Quelle die Aussendungen der physikalischen Größen gemessen und auf der Seite der Senke die Auswirkungen der physikalischen Größen über deren Wirkung in der Funktion bewertet.

Daraus folgen zwei Nachweisverfahren hinsichtlich

- Störaussendung (Emission) und
- Störfestigkeit (Immunity).

Die **Störfestigkeit (Immunity)** erfolgt mittels einer Störfestigkeitsprüfung. Hierzu wird nochmals zwischen Eigen- und Fremdstörfestigkeit unterschieden. Die Eigenstörfestigkeit ist essentiell für die bestimmungsgemäße Funktion im Elektronik- (Geräte-) Design. Die Fremdstörfestigkeit zielt auf die Robustheit der Funktion gegenüber der elektromagnetischen Umwelt ab.

Wichtig ist die Unterscheidung von Störgrößen und Prüfstörgrößen. Störgrößen treten originär und stochastisch auf und können lediglich gemessen werden. Prüfstörgrößen sind generierte und

reproduzierbare „Störgrößen“, die eigens von Generatoren erzeugt und bei Prüfung der Fremdstörfestigkeit zur Anwendung kommen.

Da die Auswahl der definierten Prüfstörgrößen, alle in der Praxis vorkommenden Störgrößen repräsentativ abbilden, lässt sich bei erfolgreicher Störfestigkeitsprüfung auch ein störungsfreier Betrieb in der Praxis erwarten.

Allerdings gelten die Ergebnisse der Störfestigkeitsprüfungen lediglich unter definierten Nebenbedingungen. Dies sind zum einen elektrische und klimatische Nebenbedingungen. Zum anderen ist dies die Erfüllung definierter Funktionsfähigkeitskriterien. Funktionsfähigkeitskriterien beschreiben exakt die bestimmungsgemäße Funktion des Prüflings (englisch: Equipment Under Test, kurz: EUT). Hiermit lässt sich unmissverständlich beschreiben, wann eine ungestörte (bestimmungsgemäße) Funktion, Störung oder ein Ausfall vorliegt. Nicht jede wahrnehmbare Störung muss zwingend eine Störung der bestimmungsgemäßen Funktion sein.

Das zweite Nachweisverfahren ist die Messung der **Störaussendung (Emission)**. Die gemessenen originären Störgrößen werden mit festgelegten Grenzwerten auf Einhaltung hin verglichen.

Letztendlich müssen bei der Festsetzung des EMV-Niveaus (Verträglichkeitspegel) die Interessen der Betroffenen (Hersteller/Inverkehrbringer, Netzbetreiber und Betreiber) gewahrt bleiben, aber auch einem ökonomischen Optimum entsprechen (Bild 2).

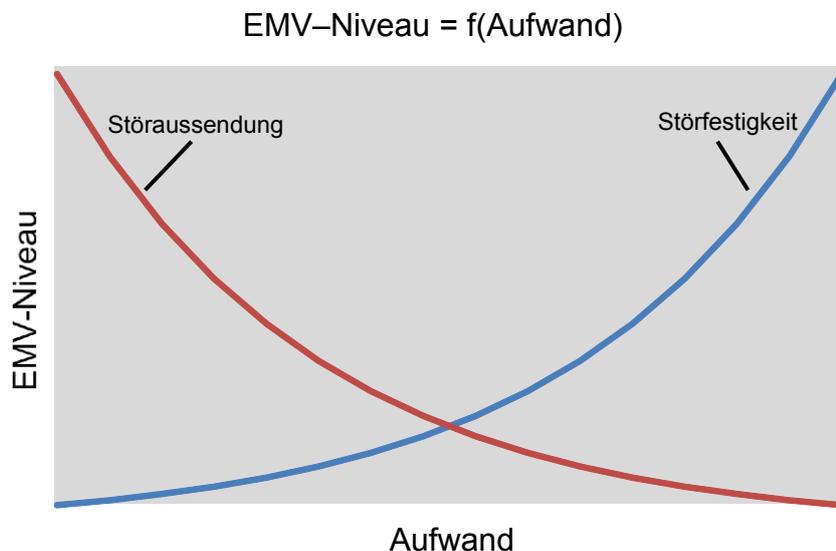


Bild 2: Wahrung des ökonomischen Optimums unter der Nebenbedingung: Störfestigkeit > Störaussendung

Naturgemäß liegen die Interessen der Hersteller bei der Festsetzung der Störaussendungs-Grenzwerte und die der Anwender bei der Festsetzung der Störfestigkeits-Pegel auf jeweils möglichst hohem Niveau (s. Bild 2: die jeweils höchsten Punkte auf der dargestellten Störaussendungs-Kurve (links) bzw. Störfestigkeits-Kurve (rechts)). Der Netzbetreiber hingegen muss den Netzbetrieb effizient gestalten und unterstützt beide genannten Forderungen.

Als Ansatz (Maßnahmen) für die Optimierung an der Quelle gelten möglichst geringe Störaussendungswerte, jedoch nur so gering wie nötig. Für die Kopplung gilt eine möglichst hohe Entkopplung, jedoch nur so hoch wie nötig. Und für die Senke gelten möglichst hohe Immunitätsschwellen, jedoch nur so hoch wie nötig.

Formal sind die vorgenannten Festsetzungen von Aussendungsgrenzwerten und Störfestigkeitspegeln normativ geregelt, international, europäisch und national. Die Europäische Kommission erließ für den Geltungsbereich der Europäischen Union eine EMC-Directive (2004/108/EG), die durch alle Mitgliedstaaten in ein jeweils nationales EMV-Gesetz überführt wurde. Damit wird die Einhaltung des EMV-Schutzzieles: „bestimmungsgemäße Funktion“ sichergestellt. In Deutschland erfolgte dies durch das Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln (EMVG).

Als Zeichen der Konformität mit den Anforderungen der Europäischen Union gegenüber Produkten dient das CE-Zeichen. Das CE-Zeichen ist kein Prüfzeichen und auch kein Qualitätszeichen. Das CE-Zeichen ist eine Erklärung des Herstellers oder Inverkehrbringers für den Europäischen Binnenmarkt auf „Konformitätsvermutung“ ihrer Produkte (Declaration of Conformity). Die Konformitätserklärung bescheinigt die Beachtung aller zutreffenden EU-Richtlinien:

- Konformitätsbeurteilungsverfahren 93/465/EWG
- Maschinenrichtlinie 2006/42/EG
- Produktsicherheitsrichtlinie 2001/95/EG
- Niederspannungsrichtlinie 2006/95/EG
- EMV-Richtlinie 2004/108/EG
- Medizinprodukterichtlinie 93/42/EWG

unter Verweis angewandter Normen (national, international), wobei auch eine Selbsterklärung grundsätzlich möglich ist. Nur für ausgewählte Fachbereiche sind akkreditierte Zertifizierer (Notified Body, formerly Competent Body) notwendig, die sogenannte Technical Construction Files (TCF) erstellen.

4.1.2 Netzurückwirkungen

Netzurückwirkungen nehmen eine Sonderstellung ein, da sie sich ausschließlich auf Elektrizitätsnetze beziehen und somit als Teilgebiet der EMV (Emission) betrachtet werden müssen. Es handelt sich ausschließlich um leitungsgebundene Störaussendungen im Frequenzbereich bis 2.500 Hz. Ein erweiterter Frequenzbereich von 2,5 kHz bis 9 kHz und bis 150 kHz ist normativ in Beratung und soll die derzeit bestehende Regelungslücke im Frequenzband zur leitungsgebundenen Funkstörspannung schließen.

Physikalische Ursachen für die Entstehung von Netzurückwirkungen sind vornehmlich Betriebsmittel mit nichtlinearer Übertragungsfunktion, Kommutierungen, hohe Gradienten du/dt und di/dt . Daraus resultieren wesentliche Phänomene wie Oberschwingungen, Zwischenharmonische, Flicker, Spannungseinbrüche (Dips), Transiente und Unsymmetrien.

Die Festsetzung von Grenzwerten der Störaussendung und das Bewertungsverfahren erfolgen klassifiziert nach Gerätestrom bis 16 A, 16 bis 75 A und größer 75 A (Einzelbewertung nach [4], wobei Kundenanlagen als Ganzes bewertet werden) und Produktfamilien:

- Haushaltgeräte
- Elektrowerkzeuge
- Beleuchtungsregler
- Audio-Einrichtungen
- Lampen
- Computer und Monitore
- TV- und Rundfunkgeräte
- Antriebe (Umrichter).

4.1.3 Versorgungsqualität

Die Versorgungsqualität in der allgemeinen elektrischen Energieversorgung umfasst die drei Säulen (s. Bild 3):

- Spannungsqualität,
- Versorgungszuverlässigkeit und
- Servicequalität.

Unter Spannungsqualität wird grundsätzlich die Beschreibung der Spannungsmerkmale in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen gemäß DIN EN 50160 verstanden. Die DIN EN 50160 ist keine EMV-Norm, obwohl sie sich maßgeblich mit Phänomenen der Netzurückwirkungen (insbesondere Oberschwingungen, Flicker und Spannungseinbrüche (Dips)) beschäftigt. Dennoch erhalten dort erwähnte Grenzwerte über die Erwähnung in verschiedenen Gesetzen bzw. darauf basierenden Verordnungen in vielen Ländern einen verbindlichen Charakter. So werden dort definierte Grenzwerte in Deutschland in den auf Basis der oben erwähnten Rahmenbedingungen des EnWG festgelegten Netzanschlussregeln (wie z.B. VDE-AR-N 4120, VDE-AR-N 4105), als Bewertungskriterium verankert.

Die Spannungsqualität ist teilweise beeinflussbar durch die Netzstruktur (Netzkurzschlussleistung und Netzimpedanzen), die Abnehmerstruktur (Verknüpfungspunkte) und die Planungsgrundsätze (Resonanzstelle etc.). Das aktuelle Spannungsqualitätsniveau wird aber auch durch das Kundenverhalten, d.h. durch den Einsatz seiner Geräte und Anlagen, beeinflusst, worauf der Netzbetreiber keinen Einfluss nehmen kann. Die somit unvermeidbare Stochastik des Spannungsqualitätsniveaus wird im Rahmen der DIN EN 50160 entsprechend berücksichtigt, z.B. in Form einer Grenzwerteinhaltung durch ein 95 %-Quantil bzw. durch praxismgerechte Erfahrungswerte.

Die Versorgungszuverlässigkeit als Komponente der Versorgungsqualität beschreibt das Maß der Verfügbarkeit, d.h. Häufigkeit und Dauer von Unterbrechungen. Die Beeinflussbarkeit der Versorgungszuverlässigkeit ist gegeben durch die Netzstruktur (Betriebsmitteltypen, Betriebsmittelalter, Verkabelungsgrad etc.), die Abnehmerstruktur (Netzdichte etc.) und den Planungsgrundsätzen (Schutzkonzept, Sternpunktbehandlung etc.). Nicht beeinflussbare Faktoren bleiben durch Witterung, Mensch (Bautätigkeit) und Tiere gegeben.

Die Servicequalität versteht sich im weitesten Sinne als Resultat des Qualitätsmanagements zur Sicherung der Beziehung zwischen Netzbetreiber und Kunden, sowohl Verbraucher als auch Erzeuger.



Bild 3: Bereiche der Versorgungsqualität in der elektrischen Energieversorgung

4.2 Normen und technische Regelwerke

Die wichtigsten Normen und technischen Regelwerke um die Themen EMV, Netzurückwirkungen und Versorgungsqualität reichen von reinen EMV-Gerätenormen (IEC 61000-x-y) über Normen zur Spannungsqualität (DIN EN 50160) und Regeln zur Beherrschung von Netzurückwirkungen [4] bis hin zu technischen Regelwerken zur Sicherung der Versorgungsqualität / Spannungsqualität / Netzurückwirkungen (VDE-Anwendungsregeln im FNN, insbesondere Technische Anschlussregeln (TAR) des VDE|FNN).

4.2.1 Verhältnis der Gesetze zu Normen und technischen Regelwerken

Innerhalb der Gesetzgebung wird die Frage des Zusammenspiels von elektrischem Netz und angeschlossenen Geräten an verschiedenen Stellen erwähnt, teilweise sogar direkt adressiert. Wie alle Bestimmungen stehen auch technische Vorgaben unter dem Zweck des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG), eine „möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente und umweltverträgliche“ Elektrizitätsversorgung anzustreben. Bei der Bewertung von Maßnahmen für elektrische Netze sowie der Entwicklung von Vorgaben für das Zusammenspiel von elektrischem Netz und Kundenanlagen sind also eine Vielzahl, einander teilweise widersprechender Kriterien zu berücksichtigen. Dies bedingt einerseits einen Einbezug der Interessen aller betroffenen Gruppen – Netzbetreiber, Geräte-/Anlagenbetreiber, Hersteller – bei der konkreten Ausgestaltung, schließt aber im Regelfall Sonderlösungen für bestimmte Kunden oder Kundengruppen zu allgemein gültigen Netzentgelten bereits aus.

Die Erarbeitung von Normen und technischen Regelwerken im Zusammenwirken der betroffenen Fachkreise im geordneten öffentlichen Verfahren ist Voraussetzung dafür, dass sie den Status als allgemein anerkannte Regeln der Technik erlangen können.

Im EnWG ist hierzu geregelt:

- § 17 (1) Betreiber von Energieversorgungsnetzen haben Letztverbraucher, gleich- oder nachgelagerte Elektrizitäts- und Gasversorgungsnetze sowie –leitungen, Erzeugungs- und Speicheranlagen sowie Anlagen zur Speicherung elektrischer Energie zu technischen und wirtschaftlichen Bedingungen an ihr Netz anzuschließen, die angemessen, diskriminierungsfrei, transparent ... sind...
- § 19 (1) Betreiber von Elektrizitätsversorgungsnetzen sind verpflichtet, unter Berücksichtigung der nach § 17 festgelegten Bedingungen für den Netzanschluss von Erzeugungsanlagen, Anlagen zur Speicherung elektrischer Energie, Elektrizitätsverteilernetzen, Anlagen direkt angeschlossener Kunden, Verbindungsleitungen und Direktleitungen technische Mindestanforderungen an deren Auslegung und deren Betrieb festzulegen und im Internet zu veröffentlichen.
- § 49 (2) Die Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik wird vermutet, wenn bei Anlagen zur Erzeugung, Fortleitung und Abgabe von
 1. Elektrizität die technischen Regeln des Verbandes der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.,
 2. Gas die technischen Regeln der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V. eingehalten worden sind.

D.h. die Anschlusspflicht (§ 17 EnWG) bedingt das Recht und die Pflicht der Definition und Veröffentlichung der entsprechenden technischen Mindestanforderungen (§ 19 EnWG).

Auch das EMVG verweist auf die Einhaltung der „einschlägig harmonisierten Normen“ als Konformitätsvermutung.

4.2.2 Normenreihe IEC 61000-x-y

Die EMV-Normenreihe IEC 61000-x-x ist wie folgt strukturiert:

- IEC 61000-2-x: EMC, Compatibility
- IEC 61000-3-x: EMC, Emission
- IEC 61000-4-x: EMC, Immunity
- IEC 61000-6-x: EMC, Generic

Ferner wird zwischen den Normengruppen Basic Standards zur Beschreibung der Phänomene, den Generic Standards (Fachgrundnorm) und den Product Standards (Produkt- und Produktfamiliennormen) unterschieden. In der Anwendung gilt stets, dass die Produkt- und Produktfamiliennormen der Fachgrundnorm vorzuziehen ist. In den meisten Fällen sind die EMV-Normen der IEC durch CENELEC als EN-Normen übernommen worden. Gemäß der CENELEC-Satzung und –Geschäftsordnung besteht die Pflicht zur nationalen Umsetzung von EN-Normen, daher gelten in Deutschland die entsprechenden DIN EN-Normen.

Tabelle 1: Matrix Produktnormen (product standards)

Gerätekategorie	Störaussendung	Störfestigkeit
ISM-Geräte	DIN EN 55011	DIN EN 61000-6-1/2
Rundfunk	DIN EN 55013	DIN EN 55020
Haushaltsgeräte Elektrowerkzeuge	DIN EN 55014-1	DIN EN 55014-2
Beleuchtung	DIN EN 55015	DIN EN 61547
ITE-Geräte	DIN EN 55022	DIN EN 55024
Medizingeräte	DIN EN 60601-1-2	DIN EN 60601-1-2
Antriebstechnik	DIN EN 61800-3	DIN EN 61800-3

Die Fachgrundnorm unterteilt in die Grenzwerte für die Störaussendung und die Prüfstörgrößengrade für die Störfestigkeit an Hand von Umgebungsklassen. Demnach harmonisiert niedrige Störaussendung mit niedriger Störfestigkeit für Haushaltsumgebung und umgekehrt für Industrieumgebung.

Tabelle 2: Matrix Fachgrundnorm (generic standards)

Umgebung	Störaussendung	Störfestigkeit
Haushalte und Gewerbe	DIN EN 61000-6-3	DIN EN 61000-6-1
	(DIN EN 50081-1)	(DIN EN 50082-1)
Industrie	DIN EN 61000-6-4	DIN EN 61000-6-2
	(DIN EN 50081-2)	(DIN EN 50082-2)

Insbesondere für Spannungseinbrüche (Dips) und Versorgungsunterbrechungen (Interruptions) gelten folgende Normen IEC/TR 61000-2-8, DIN EN 61000-4-11 und DIN EN 61000-4-34. Ein TR (Technical Report) beinhaltet hierbei lediglich die Ergebnisse einer Untersuchung.

4.2.3 DIN EN 50160

Die aktuelle Fassung DIN EN 50160:2011-02: „Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen; Deutsche Fassung DIN EN 50160:2010 + Cor.:2010“ gilt für Hoch-, Mittel- und Niederspannung. Die Norm fordert für die wesentlichen Phänomene wie Oberschwingungen und Flicker die Einhaltung der Grenzwerte über 95 % der gemessenen 10-Minuten-Mittelwerte einer Woche.

4.2.4 Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen (D-A-CH-CZ)

Aktuell ist die D-A-CH-CZ „Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen“ [4] für die Anschlussbewertung von Kundenanlagen bezüglich Netzurückwirkungen in Hoch-, Mittel- und Niederspannung verfügbar. Sie gilt für Abnehmer- und Erzeugungsanlagen (in Deutschland sind Erzeugungsanlagen ausgenommen). Die beschriebenen Phänomene entsprechen denen der DIN EN 50160.

4.2.5 VDE-Anwendungsregeln

VDE-Anwendungsregeln (FNN) beschreiben in Bezug auf EMV, Netzrückwirkungen und Versorgungsqualität nur in einzelnen Abschnitten spezielle Anforderungen aus Sicht der Netzbetreiber, u.a. mit Verweis auf entsprechende Normen und Richtlinien.

Derzeit erfolgt eine Überführung der Technischen Anschlussbedingungen (TAB) für die einzelnen Spannungsebenen in einheitliche Technische Anschlussregeln (TAR) des FNN.

4.2.6 Aussagen zu Spannungseinbrüchen in Normen und Regelwerken

Das Merkmal Spannungseinbruch ist in der Norm DIN EN 50160 als eine plötzliche Reduktion der Versorgungsspannung auf einen Wert unter 90 % bis minimal 5 % der vereinbarten Versorgungsspannung definiert. Die Dauer einer solchen Spannungsabsenkung liegt zwischen 10 ms und 1 min. Grenzwerte werden in der DIN EN 50160 nicht vorgegeben, für Erfahrungswerte wird auf IEC/TR 61000-2-8 und den Umstand verwiesen, dass der überwiegende Teil der Spannungseinbrüche eine Dauer von weniger als 1 s aufweist. Für Messungen enthält die Norm ein Klassifizierungsschema der Einbrüche nach Tiefe und Dauer.

Auch die Normen im direkten Umfeld der elektromagnetischen Verträglichkeit (z.B. DIN EN 61000-2-2 für NS-Netze, DIN EN 61000-2-12 für MS-Netze) setzen keine netzbezogenen Grenzwerte. Vielmehr wird auf das unvermeidbare Auftreten mindestens bei Kurzschlüssen im Netz verwiesen.

Dementsprechend beinhalten die in den letzten Jahren entwickelten Netzanschlussregeln für Erzeugungsanlagen an Netze der allgemeinen Versorgung (VDE-AR-N 4120, BDEW-MS-RL, VDE-AR-N 4105) mit Ausnahme der für die Niederspannung die Anforderung, dass die Erzeugungsanlagen Spannungseinbrüche durchfahren können müssen. Dabei muss ein beliebig großer Spannungseinbruch für etwa 150 ms durchfahren werden können, bei weniger tiefen Einbrüchen gelten größere Dauern. Die Dauer für sehr tiefe Einbrüche orientiert sich an der technisch notwendigen Fehlerklärungszeit in Höchst- und Hochspannungsnetzen sowie zentralen Stationen des Mittelspannungsnetzes, da dort auftretende Kurzschlüsse für eine große Zahl an Erzeugungsanlagen zu Spannungseinbrüchen an ihren Netzanschlusspunkten führen.

Für Verbrauchsgeräte finden sich in gerätebezogenen Normen Anforderungen, die ebenfalls eine Störfestigkeit in Abhängigkeit von Spannungseinbruchtiefe und –dauer vorgeben. Diese sind in ihrer Gültigkeit für bestimmte Geräteklassen über Fachgrundnormen und den vorrangig wirkenden Produktnormen gestaffelt. Beispielhaft seien hier genannt DIN EN 61000-6-1, DIN EN 61000-6-2, DIN EN 55024 und [5].

Die Störfestigkeitspegel zur Prüfung gegenüber Spannungseinbrüchen nach ausgewählten Normen sind in Tabelle 3 dargestellt.

Ergänzend sind in Tabelle 4 die Störfestigkeitspegel zur Prüfung gegenüber Spannungsunterbrechungen nach ausgewählten Normen aufgeführt.

Die Tabelle 5 beschreibt die Funktionsfähigkeitskriterien zur Bewertung bei Störfestigkeitsprüfungen gegenüber Spannungseinbrüchen und –unterbrechungen nach ausgewählten Normen.

Die im Rahmen der Prüfverfahren nach DIN EN 61000-2-4 angewendeten EMV-Umgebungsklassen zur Anwendung bei Störfestigkeitsprüfungen gegenüber Spannungseinbrüchen und –unterbrechungen sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Die in ausgewählten Normen definierten minimalen Störfestigkeitspegel der entsprechenden Geräte gegenüber Spannungseinbrüchen zeigt Bild 4. Sie leiten sich aus den in den Normen definierten Prüfstörgrößen ab.

Tabelle 3: Störfestigkeitspegel zur Prüfung gegenüber Spannungseinbrüchen nach ausgewählten Normen

Typ	Norm	Reduktion (in %)	Restspannung (in %)	Dauer (in ms)	Bewertungskriterium	Nebenbedingung	Referenz
Fachgrundnorm	DIN EN 61000-6-1: 2007	100	0	10	B	Spannungssprung im Nulldurchgang	DIN EN 61000-4-11: 2004
		100	0	20	B		
		30	70	500	C		
Fachgrundnorm	DIN EN 61000-6-2: 2006	100	0	20	B	Spannungssprung im Nulldurchgang	DIN EN 61000-4-11: 2004
		60	40	200	C		
		30	70	500	C		
Produkt norm IT	DIN EN 55024:2015	>95	<5	10	B	Spannungssprung im Nulldurchgang	DIN EN 61000-4-11: 2004
		30	70	500	C		
Prüfverfahren	DIN EN 61000-4-11: 2004				Klasse 1		
		100	0	10	Klasse 2		
		100	0	20			
		30	70	500	Klasse 3		
		100	0	10			
		100	0	20			
		60	40	200			
		30	70	500			
20	80	5000					

Tabelle 4: Störfestigkeitspegel zur Prüfung gegenüber Spannungsunterbrechungen nach ausgewählten Normen

Typ	Norm	Reduktion (in %)	Restspannung (in %)	Dauer (in s)	Bewertungskriterium	Nebenbedingung	Referenz
Fachgrundnorm	DIN EN 61000-6-1: 2007	100	0	5	C	Spannungssprung im Nulldurchgang	DIN EN 61000-4-11: 2004
Fachgrundnorm	DIN EN 61000-6-2: 2006	100	0	5	C	Spannungssprung im Nulldurchgang	DIN EN 61000-4-11: 2004
Produkt norm IT	DIN EN 55024:2015	>95	<5	5	C	Spannungssprung im Nulldurchgang	DIN EN 61000-4-11: 2004
Prüfverfahren	DIN EN 61000-4-11: 2004				Klasse 1		
		100	0	5	Klasse 2		
		100	0	5	Klasse 3		

Tabelle 5: Funktionsfähigkeitskriterien zur Bewertung bei Störfestigkeitsprüfungen gegenüber Spannungseinbrüchen und –unterbrechungen nach ausgewählten Normen

Funktionsfähigkeits-Kriterium	Referenz: DIN EN 61000-6-1:2007; DIN EN 61000-6-2:2006; DIN EN 55024:2015
Bewertungskriterium A	Definierte bestimmungsgemäße Funktion während und nach Prüfstörgrößenbeaufschlagung gegeben
Bewertungskriterium B	Verlust der definierten bestimmungsgemäßen Funktion während Prüfstörgrößenbeaufschlagung zulässig; definierte bestimmungsgemäße Funktion nach Prüfstörgrößenbeaufschlagung gegeben
Bewertungskriterium C	Funktionsausfall zulässig; Funktion wiederherstellbar durch Operator

Tabelle 6: EMV-Umgebungsklassen zur Anwendung bei Störfestigkeitsprüfungen gegenüber Spannungseinbrüchen und -unterbrechungen gemäß DIN EN 61000-2-4:2002

EMV-Umgebungs-klasse	Referenz: DIN EN 61000-2-4:2002
Klasse 1	Verträglichkeitspegel < Pegel öffentlicher Netze
Klasse 2	Verträglichkeitspegel = Pegel öffentlicher Netze
Klasse 3	Verträglichkeitspegel > Pegel öffentlicher Netze

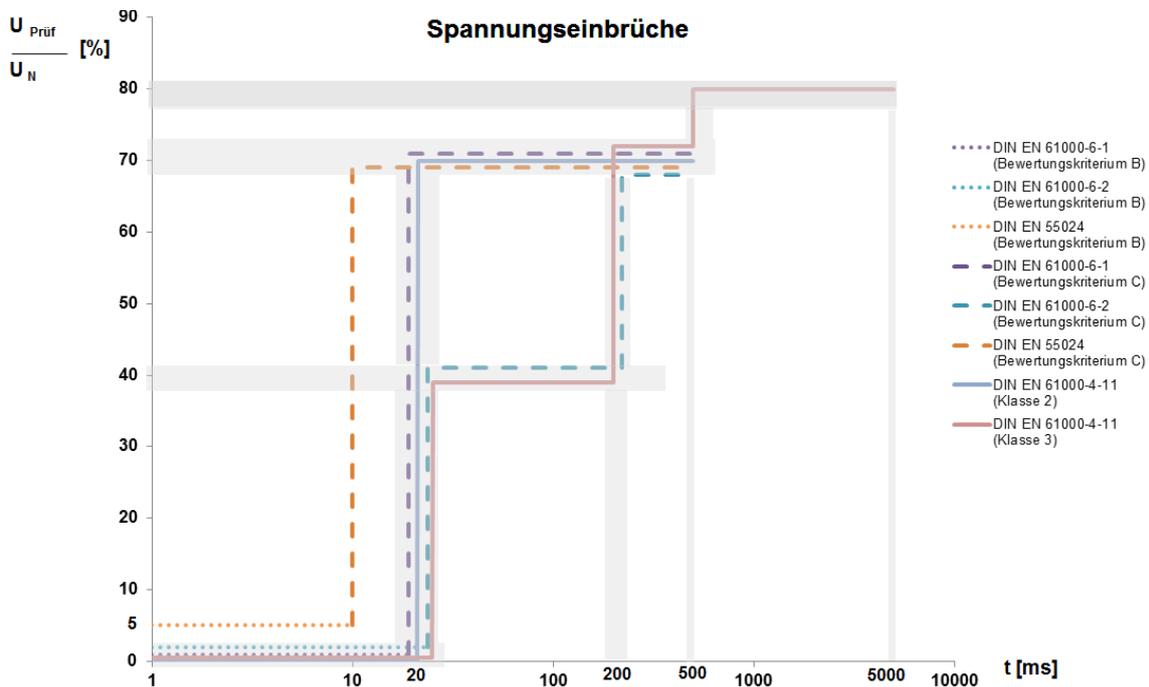


Bild 4: Gerätebezogene Störfestigkeitskurven verschiedener Normen

Eine Störfestigkeit gegen tiefe Spannungseinbrüche wird von den Normen nur für eine Dauer bis 10 ms (für IT-Produkte) bzw. 20 ms (für sonstige Geräte im Wohn-, Gewerbe- und Industriebereich) gefordert.

Für Geräte im Industriebereich gelten strengere Grenzwerte für die Störfestigkeit als für Geräte im Wohn-, Geschäfts- und Gewerbebereich sowie Kleinbetriebe hinsichtlich der Dauern von Spannungseinbrüchen zwischen 20 und 200 ms, die ohne Fehlfunktion oder gar Ausfall überstanden werden müssen.

Zudem gibt es Selbstverpflichtungen von Herstellern oder deren Verbände. Besonders bekannt ist die sogenannte ITI-Kurve (ITIC, früher CBEMA-Kurve), die vom amerikanischen Information Technology Industry Council für Geräte der Informationstechnik definiert wurde [6]. Bezüglich Dips stimmt sie bis Dauern von 500 ms mit derjenigen aus der DIN EN 61000-6-1 überein. Zudem werden auch Anforderungen im Zeitbereich über 500 ms formuliert.

Die Normung fokussiert auf die Festlegung von Grenzwerten für Massengeräte. In den Normen werden auch Anforderungen zur Störfestigkeit von Geräten in einer Industrieumgebung gestellt (s. DIN EN 61000-6-2). Darüber hinaus gibt es spezielle Anwendungen unter spezifischen Bedingungen, die weitergehende spezifische Lösungen erfordern.

Als Beispiel für Branchen spezifische Anforderungen sei auch SEMI genannt. Diese geben für die Halbleiterindustrie Grenzwerte an, welche Restspannung deren Geräte für einen bestimmten Zeitraum ohne Ausfall überstehen müssen. Demnach werden im Zeitbereich bis 20 ms und im Zeitbereich 200 ms bis 500 ms die gleichen Anforderungen gestellt wie nach DIN EN 61000-6-1 und DIN EN 61000-6-2. Im Zeitbereich zwischen 20 ms und 200 ms ist die Anforderung etwas geringer als in der DIN EN 61000-6-2. Zudem werden Anforderungen im Zeitbereich über 500 ms gestellt. Dies zeigt, dass bestimmte Branchen die Bedeutung der Störfestigkeit bereits erkannt haben und höhere Anforderungen stellen als in der Normung.

5 Entstehung von Spannungseinbrüchen

Spannungseinbrüche entstehen im wesentlichen durch

- Fehler, vorwiegend Kurzschlüsse mit unterschiedlichsten Ursachen (s. Abschnitt 5.1), sowie
- Rückwirkungen durch betriebsbedingte Vorgänge, insbesondere in Kundenanlagen, die aber im Rahmen der Anlagenplanung berücksichtigt werden müssen (s. Abschnitt 5.2).

Kurzschlussströme verursachen an der Netzimpedanz einen Spannungsfall, der zu einer kurzzeitigen Absenkung der Spannung führt. Der Spannungseinbruch hält so lange an, bis die Netzschutzeinrichtung den Fehler möglichst selektiv abschaltet.

Die Netzstörungen werden nach der Spannungsebene, in der die Ursache für die Netzstörung liegt, unterschieden.

Ein Spannungseinbruch in einem Netz wird ungedämpft auf die unterlagerten Netzebenen weitergereicht, sofern sich dort keine Kurzschlussstromquellen befinden (Bild 5, Fehler ①). Für diesen Fall reduziert sich ein Spannungseinbruch, der in nachgelagerten Netzteilen verursacht wird, in den übergeordneten Netzebenen im umgekehrten Verhältnis der in der Regel sämtlich ohmsch-induktiven Netzimpedanzen (s. Bild 5, ②). Spannungseinbrüche, welche im gleichen galvanisch verbundenen Netz wie ein betrachteter Kundenanschluss liegen, können somit eine ähnliche Spannungstiefe aufweisen wie diejenigen in vorgelagerten Netzen (s. Bild 5, ① und ②). Durch Ereignisse in parallelen (s. Bild 5, ④) oder nachgelagerten Netzteilen (s. Bild 5, ③) wird dagegen in der Regel ein weniger tiefer Spannungseinbruch am hier betrachteten Kundenanschluss auf der Unterspannungsseite (US) wahrgenommen. Kurzschlussstromquellen in elektrischer Nähe des betrachteten Kundenanschlusses verringern in der Regel die Spannungseinbruchtiefe.

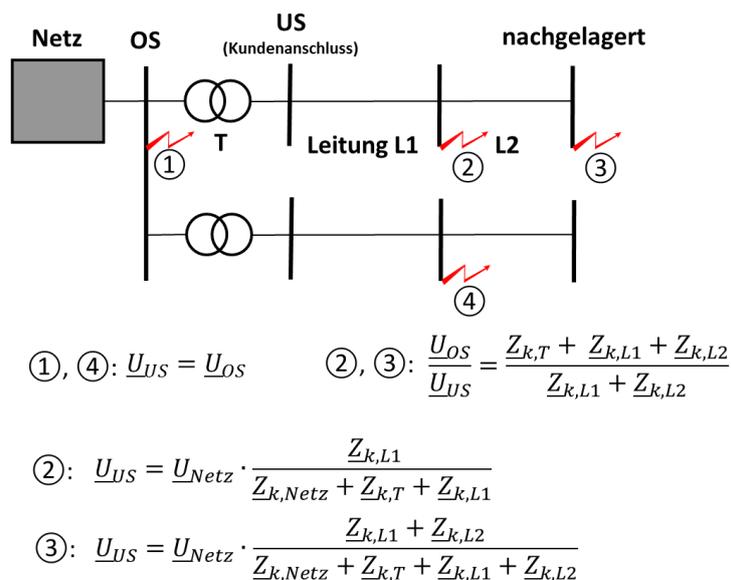


Bild 5: Auswirkung eines Kurzschlusses in einer unterlagerten Netzebene auf die übergeordnete Netzebene (alle Spannungen bezogen auf jeweilige Nennspannung)

5.1 Spannungseinbrüche durch nicht planbare Ereignisse

Das Auftreten kurzer Spannungseinbrüche durch kurzschlussartige Ereignisse ist ein unvermeidbarer Bestandteil der Stromversorgung. Die Ursachen hierfür sind zum großen Teil nicht oder nur schwer beeinflussbar. Auslöser sind im Wesentlichen:

- Atmosphärische Einwirkung (Gewitter mit Blitzschlag in Betriebsmittel, Sturm, ...)
- Fremde Einwirkung (Vögel in einer Freileitung, Erd- und Baggerarbeiten mit Beschädigung eines Kabels, ...)
- Sonstige Einwirkungen, z.B. Vorbeschädigungen von Kabeln durch Bauarbeiten, Produktions- und Montagefehler sowie Betriebsmittel-Defekte, die zu einem technischen Versagen führen.

Je nach Netzebene und Ursache werden im Folgenden aus der betrieblichen Praxis typische Szenarien für das Auftreten von Spannungseinbrüchen aufgezeigt:

- Spannungseinbrüche in Freileitungsnetzen
Die meisten HS-Netze, aber auch viele MS-Netze, besitzen einen hohen Freileitungsanteil und werden daher erdschlusskompensiert (mit Resonanzsternpunktterdung) betrieben. Die Vielzahl der einpoligen Fehler (z.B. durch Blitzeinschlag) wird automatisch gelöscht (Erdschlusswischer). Der spürbare Spannungseinbruch dauert max. 100ms. Zur Behandlung mehrpoliger Fehler (z.B. Blitzschlag zwischen Phasenleitern) kann eine AWE (KU) eingesetzt werden. Hierbei wird ein automatischer Zuschaltversuch nach der geringstmöglichen Zeit durchgeführt (Entionisierung der Schalter). Der Spannungseinbruch (bzw. die anschließende KU) ist für Kundenanlagen im Schutzabschnitt der betroffenen Leitung für die gesamte Fehlerdauer (Schaltzeit + Offenzeit) von üblicherweise 500ms spürbar. Anschlussnutzer auf Nachbarleitungen, bzw. im selben Netz angeschlossene nehmen nur die Zeit bis zur erstmaligen Abschaltung (rd. 100ms) als Spannungseinbruch wahr.¹ Diese Vorgehensweise erhöht die Versorgungszuverlässigkeit der Anschlussnutzer enorm, da die einzige Alternative hierzu in der (längeren) Abschaltung der fehlerhaften Leitung liegt.
HS-Netze sind i.d.R. (n-1)-sicher aufgebaut und werden vermascht betrieben. Damit ist eine erheblich höhere Zuverlässigkeit der Versorgung möglich, da der Ausfall eines Betriebsmittels keine Versorgungsunterbrechung hervorruft. Allerdings ist so der Wirkungsbereich eines Spannungseinbruchs entsprechend größer und kann von mehreren Anschlussnutzern bemerkt werden.
- Spannungseinbrüche durch Fehler in benachbarten (galvanisch verbundenen) Netzen/Strängen und Kundenanlagen (s. Bild 6)
In diesem Zusammenhang sind Kurzschlüsse mit Abstand die häufigste Fehlerart in öffentlichen Netzen. Die meisten davon treten im MS-Netz auf. Entsteht ein Kurzschluss auf einem MS-Strang (z.B. durch Baggereingriff oder auch Gewitter, so nehmen zwangsläufig alle Kunden des MS-Netzes (also die benachbarten Stränge, siehe Bild 6, grüne Stränge) einen Spannungseinbruch wahr, bis der Fehler abgeschaltet wird. Dies dauert in aller Regel 0,2-1s, in speziellen Einzelfällen bis zu 3s. Mit dieser zeitlichen Staffelung wird die Selektivität des Schutzes gewährleistet und der dauerhaft abgeschaltete Netzbereich möglichst klein gehalten.

¹ Im möglichen Fall einer erfolglosen AWE kommt es zu einem weiteren Spannungseinbruch durch das Wiederaufschalten auf den Fehler bis zum Abschalten des Fehlers. In einigen Netzschutzkonzepten ist eine Wiederholung der AWE vorgesehen, so dass es zu wiederholten Spannungseinbrüchen/KU kommen kann.

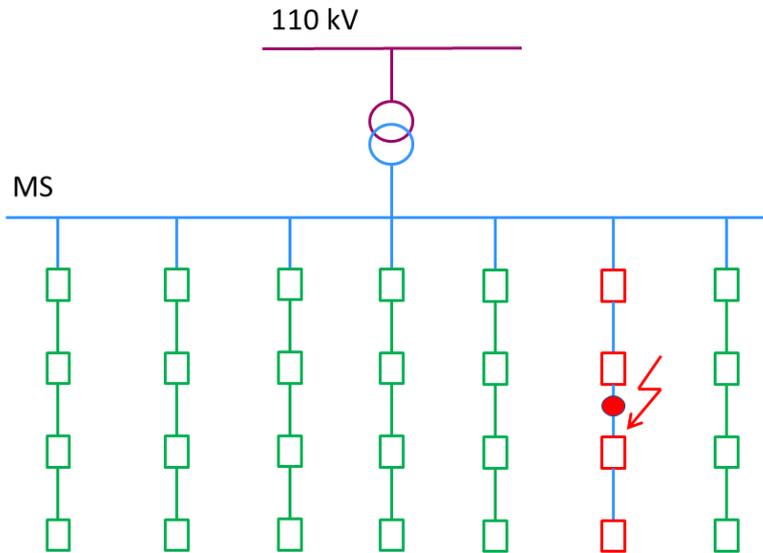


Bild 6: Darstellung eines Fehlers in einem benachbarten (galvanisch verbundenen) Netz/Strang

- Spannungseinbrüche durch Kurzschlüsse im Niederspannungsnetz
Je nach Fehlerort und Überstromschutzeinrichtung können diese unterschiedliche Dauern aufweisen. Die Dimensionierung der Überstromschutzeinrichtungen (insbesondere Sicherungen) wird dabei in der DIN VDE 0100 Teil 410 beschrieben. Vereinfacht lässt sich dabei sagen, dass Spannungseinbrüche mit deutlicher Wirkung im Gesamtnetz einer Ortsnetzstation durch stationsnahe Fehler (hoher Kurzschlussstrom) entstehen und spätestens nach wenigen Sekunden abgeschaltet werden. Stationsferne Fehler mit deutlich kleineren Fehlerströmen dagegen, haben aus Sicht des Spannungseinbruchs i.d.R. nur eine begrenzte Wirkung im betroffenen Abgang, können dabei aber deutlich länger anstehen

In der Tabelle 7 sind typische Dauern eines Spannungseinbruchs durch übliche Fehlerklärungszeiten dargestellt.

Tabelle 7: Dauer eines Spannungseinbruchs durch übliche Fehlerklärungszeiten (1), (2)

Spannungsebene	Störungsereignis	Sternpunktbehandlung		
		niederohmig (starr) geerdet	Erdschlusskompensation	KE (KNOSPE)
HS	Erdschluss/ Erdkurzschluss	ca. 100 ms ...500 ms (1)	0 ms	n.a.
	mehrpolige Kurzschlüsse	ca. 100 ms (1)	ca. 100 ms (1)	n.a.
MS	Erdschluss/ Erdkurzschluss	ca. 300 ms bis 1 s (3)	0 ms	ca. 100 ms bis 300 ms
	mehrpolige Kurzschlüsse	ca. 300 ms bis 1 s (3)	ca. 300 ms bis 1 s (3)	n.a.

Erläuterungen zur Tabelle 7 hinsichtlich der Zusammensetzung der genannten Zeiten:

- (1) Gilt aus Sicht einer Kundenanlage, die durch einen geeigneten Transformator galvanisch vom Netz getrennt ist.
- (2) Wenn eine AWE eingesetzt wird, führt dies zu einer KU von ca. 500 ms bei Kundenanlagen, die ausschliesslich an der mit der AWE ansprechenden Leitung angeschlossen sind.
- (3) HS: Anrege- plus Auslösezeit der Schutzeinrichtung (Schutzgerät plus Leistungsschalter)
MS: Anrege(Staffelzeit)- plus Auslösezeit der Schutzeinrichtung (Schutzgerät plus Leistungsschalter) [7]

In der HÖS-Ebene gelten die Verhältnisse wie bei niederohmig geerdeten HS-Netzen, wobei noch kürzere Fehlerklärungszeiten bis zur durch Fehlererfassung und Schaltereigenzeit definierten Untergrenze von 50 ms bis 70 ms möglich sind.

In Industrienetzen sind die Fehlerklärungszeiten ähnlich. Darüber hinaus sind folgende Merkmale typisch für Industrienetze:

- In der Niederspannung erfolgt die Absicherung durch geeignete Sicherungen oder Leistungsschalter.
- Die Verteilnetze sind meist strahlenförmig oder vermascht ausgeführt, die maximalen Fehlerklärungszeiten richten sich nach Vorgabe des vorgelagerten Netzes.
- MS-Netze sind im Allgemeinen von kleiner Ausdehnung und werden isoliert betrieben, größere sind meist Erdschluss kompensiert.
- Im NS-Bereich gibt es häufig isoliert betriebene Netze, um im Erdschlussfall keine Abschaltung zu verursachen.

Unabhängig von der betrachteten Spannungsebene gilt, dass in einer vermaschten Netzstruktur gegenüber einer strahlenförmigen Netzstruktur, tendenziell kleinere Impedanzen und damit eine größere Betroffenheit von Kunden bei Spannungseinbrüchen vorliegt (d.h., die gleiche Anzahl an Spannungseinbrüchen wird von mehr Kunden wahrgenommen). In der Regel wird aber der wahrgenommene Spannungseinbruch von geringerer Tiefe sein.

5.2 Spannungseinbrüche durch deterministische Ereignisse

Auf der Kundenseite werden Spannungseinbrüche durch deterministische Ereignisse, z.B. durch Anschalten von Lasten großer Leistungen hervorgerufen. So können zum Beispiel durch Anläufe großer motorischer Lasten hohe Leistungsänderungen auftreten, die abhängig von der vorhandenen Kurzschlussleistung zu einem entsprechenden Spannungseinbruch auf der jeweiligen Zuleitung (bzw. im jeweiligen Netz) führen.

Die technische Bewertung für den Anschluss der Kundenanlage an das öffentliche Netz erfolgt auf Basis der allgemein geltenden Technischen Anschlussregeln (TAR) und der spezifischen veröffentlichten Technischen Anschlussbedingungen (TAB) des Netzbetreibers. Damit ist sichergestellt, dass durch die angeschlossene Kundenanlage keine unzulässigen Rückwirkungen auf andere Kundenanlagen im öffentlichen Netz entstehen, sofern diese normgerecht ausgelegte Betriebsmittel verwenden.

Unter dieser Voraussetzung sollte somit nur noch der Fall auftreten, dass innerhalb der Kundenanlage selbstverursachte unzulässige Rückwirkungen auftreten. Solche Fälle liegen im Verantwortungsbereich des Kunden, d.h. der Kunde muss selbst für Abhilfe sorgen. Um solche Störungen zu vermeiden, muss der Kunde bei der Planung bzw. Erweiterung seiner Anlage

darauf achten, dass z.B. das Anschalten von Lasten großer Leistungen nicht zu Störungen in der eigenen Kundenanlage führt.

Große Lasten verursachen Spannungseinbrüche z.B. durch:

- Ein- und Ausschaltvorgänge,
- Motoren größerer Leistung beim Anlauf und Laständerungen,
- Gepulste Leistung (Schwingungspaketsteuerung, Thermostatsteuerungen),
- Einsatz von Lichtbogenöfen oder Schweißmaschinen,
- Einschaltströme von Transformatoren/Drosseln (Inrush)
- Einschaltströme von Kondensatoren,
- Plötzlichen Wegfall/Zuschaltung von EZE innerhalb der Kundenanlage.

Auf der Netzseite stellen Schalthandlungen durch den Netzbetreiber planbare Ereignisse dar, die zu Spannungseinbrüchen führen können. Diese führen aber nur zu Spannungseinbrüchen geringer Tiefe, weil im Rahmen der Netzplanung Grenzwerte für die Spannungssprünge berücksichtigt werden.

5.3 Historische Entwicklung der Spannungseinbrüche

Die beschriebenen Effekte und die damit verbundenen Spannungseinbrüche können nicht gänzlich verhindert werden. Die Spannungseinbrüche selbst werden wegen des unverhältnismäßigen Aufwandes nicht flächenmäßig erfasst. Die bekannten Ursachen für die Spannungseinbrüche (Kurzschlüsse im Netz aus diversen Gründen) werden aber sehr wohl dokumentiert. Die zeitliche Entwicklung dieser kurzschlussartigen Fehler ist in Bild 7 dargestellt.

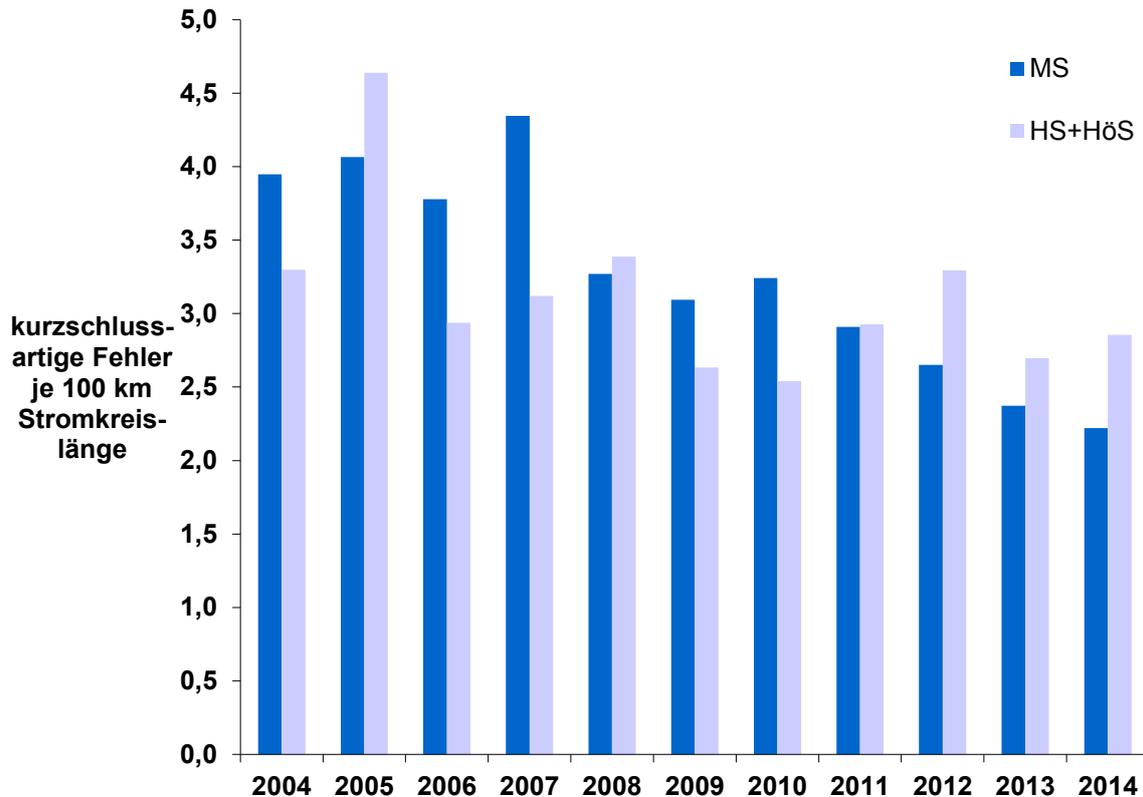


Bild 7: Zeitliche Entwicklung der auf die Stromkreislänge bezogenen kurzschlussartigen Fehler aus der FNN-Störungsstatistik (als Richtgröße für aufgetretene Spannungseinbrüche)

Wie aus Bild 7 erkennbar, ist gegenüber der eingangs genannten Wahrnehmung durch Kunden eher eine Abnahme der Vorgänge in den letzten Jahren erkennbar. Die Gründe liegen vor allem in einer zunehmenden Verkabelung der Netze sowie der Verwendung von Betriebsmitteln (z.B. Schaltanlagen) mit höherer Zuverlässigkeit. Diese Entwicklung ist allerdings technisch begrenzt, da Kabelnetze zwar zuverlässiger sind als Freileitungsnetze, aber nicht störungsfrei (z.B. Bauarbeiten).

6 Systemanalyse auf der Kundenseite

6.1 Prozessbeschreibung

Elektrische Energie ist ein wichtiger Faktor für alle Produktionsprozesse in der Industrie. Die Qualität der elektrischen Energieversorgung bestimmt u.a. die Produktionskosten und die Produktqualität. Für hochautomatisierte, industrielle Produktionsprozesse können bereits Spannungseinbrüche unterhalb einer Sekunde Dauer zu erheblichen Produktionsausfällen und weiteren Folgekosten führen.

Für einen störungsfreien Prozess ist es unabdingbar, dass der Kunde die kritischen Elemente seines Prozesses kennt. Da eine unterbrechungsfreie Absicherung ganzer Anlagen oder Fabriken nur in Einzelfällen wirtschaftlich ist, ist es sinnvoller nur die sensiblen Bereiche angemessen gegen Spannungseinbrüche zu schützen, die nach Rückkehr der Spannung nicht sofort uneingeschränkt weiterlaufen.

Je nach Anlagentyp lassen sich drei Fälle unterscheiden:

- Prozessanlagen fallen bei kurzzeitigem Spannungseinbruch aus und müssen neu angefahren werden. Es sind umfangreiche Eingriffe in den Anlagen erforderlich, z.B. Reinigung (Produktionsausfall)
- Prozessanlagen bleiben stehen, können aber innerhalb kurzer Zeit wieder angefahren werden. Es entsteht kein nennenswerter Folgeaufwand (Produktionsverlust)
- Prozessanlagen bleiben stehen, laufen aber bei Spannungswiederkehr ohne Qualitätsverluste automatisch wieder an. Es ist in der Regel kein Eingriff in die Anlage notwendig.

6.2 Planungsansätze

Im Rahmen der Planung einer Kundenanlage sollten folgende Aspekte geklärt bzw. berücksichtigt werden:

- Welche Verfügbarkeit der Kundenanlage wird angestrebt?
- Welche Störgrößen werden bei den Verbrauchern (Geräte, Anlagenkomponenten) erwartet und welche Priorität haben diese Verbraucher für den Prozess?
- Wo sind kritische Verbraucher im Prozess?

6.3 Überprüfung in bestehenden Kundenanlagen

In bestehenden Anlagen sollten folgende Aspekte beachtet werden:

- Analyse der Versorgungsstruktur bzgl. der Frage, welche Störgrößen auf die angeschlossenen Verbraucher einwirken können. Welche Verbraucher müssen abgesichert werden?
- Überprüfen, ob die in der Kundenanlage eingestellten Geräteparameter bereits im ausreichenden Maße die Auswirkungen möglicher Netzverhältnisse / Netzbetriebszustände berücksichtigen
- Schutzkonzept und -parameter überprüfen und angleichen, so dass der Über-/Unterspannungsschutz auf die Gerätestörfestigkeit abgestimmt ist und damit das Schutzgerät

nicht ungewollt auslöst. Zum Beispiel sollten Geräte nicht mit der Werkseinstellung ungeprüft in Betrieb gehen. Eine Abstimmung von Schutzparametern zwischen Schalter an der Übergabestelle (Einspeisung) und nachgeschalteten USV-Anlagen ist erforderlich.

- Mit einer Risikomatrix kann eine Abschätzung zu möglichem wirtschaftlichen Schaden, bei Häufigkeit von Spannungseinbrüchen unterschiedlicher Dauer, dokumentiert werden.

Bei Auslegung des gesamten Prozesses muss auch die einzelne Komponente der Anlage geeignet berücksichtigt werden, um Schwachstellen erkennen und geeignete Abhilfe-Maßnahmen ergreifen zu können.

6.4 Dokumentation der Störung und seinem Umfeld

Als wesentliche Quelle zur Ermittlung möglicher und sinnvoller Abhilfe-Maßnahmen dient eine geeignete Dokumentation der Störungen und des entsprechenden Umfeldes. Daher werden hierzu nachfolgend einige Hinweise gegeben:

- Für eine ausreichende Dokumentation sind aussagekräftige Prozessdaten und die Spannungsverläufe möglichst aller externen Verknüpfungspunkte und internen Kundenverteilungen erforderlich;
- Ort, Datum, Uhrzeit des Störungsereignisses sowie betroffene Geräte bzw. Anlagen (Fehlerbildbeschreibung);
- Spannungseinbrüche sind systematisch zu erfassen, z.B. nach DIN EN 50160 Klassifizierung (diese Klassifizierung basiert u.a. auf den Produktnormen);
- Die Ursachen eines Betriebsmittelausfalls sind zu analysieren (hier speziell elektrische Ursache, z.B. tatsächliche Gerätestörung oder Schutz auslösung);
- Zur Erstellung einer Risikomatrix (s. Abschnitt 6.3) ist die Dokumentation von Störungen (z.B. Häufigkeit und Dauer) unter den Gesichtspunkten in Bild 8 notwendig.

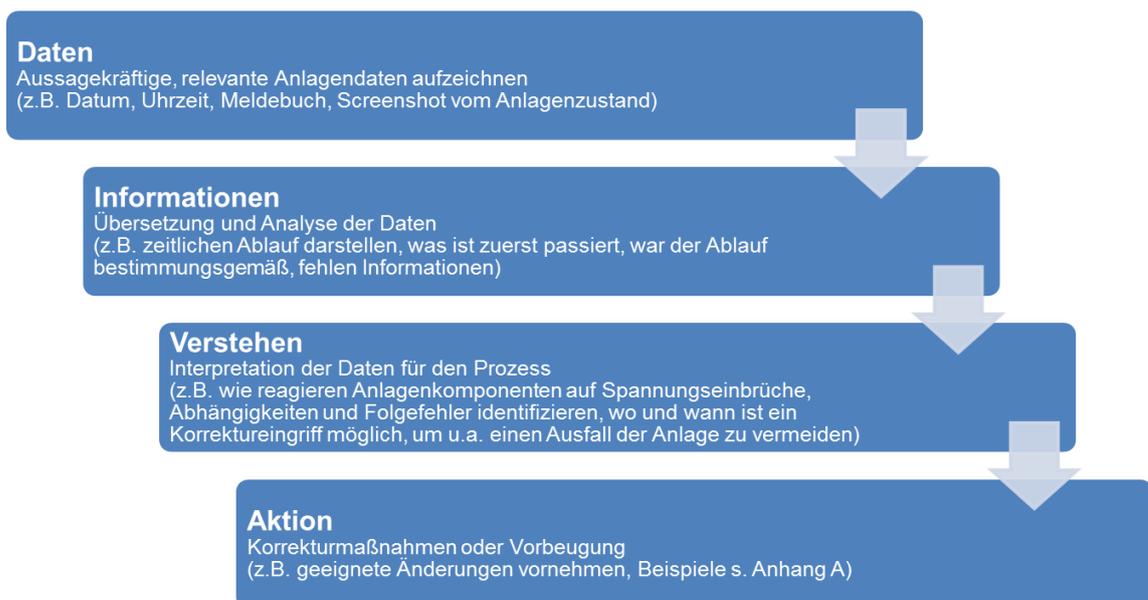


Bild 8: Wichtige Gesichtspunkte bei der Dokumentation von Störungen

- Funktionsfähigkeitskriterium ggf. einfügen und diskutieren: ab wann liegt eine Störung bzw. ein Ausfall vor;
- Bei Spannungseinbrüchen sind zwei Bereiche zu unterscheiden:
 - Anlass des Spannungseinbruchs innerhalb der Kundenanlage (z.B. durch Schaltvorgänge oder Lastabtrennung)
 - Anlass des Spannungseinbruchs im vorgelagerten Netz (z.B. durch atmosphärische Einwirkungen, wie Gewitter).

6.5 Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung dienen u.a. folgende Festlegungen:

- geeignete Anschlusspunkte unter Berücksichtigung der internen Verteilungsstruktur;
- Änderungsmanagement bei Erweiterung, Umbau oder Ersatzbeschaffung von Geräten, Maschinen und Anlagen, um den bisherigen Status bezüglich der Störfestigkeit zu erhalten.

7 Mögliche Abhilfe-Maßnahmen in öffentlichen Netzen, Kundenanlagen und Kundennetzen

7.1. Durch Schaltung bzw. große Leistungsänderungen von Kundenanlagen verursachte Spannungseinbrüche

Zur Reduzierung von unzulässigen Einschaltströmen muss die Netzverträglichkeit von Kundenanlagen im Vorfeld beurteilt werden [4]. Um gemeinsame Lösungen zu finden ist eine Abstimmung zwischen dem Planer der Kundenanlage und dem Netzbetreiber im Vorfeld notwendig. Zwingend muss eine Klärung der folgenden Randbedingungen erfolgen:

- Netzanschlusspunkt / Verknüpfungspunkt
- Kurzschlussleistung am Netzanschlusspunkt / Verknüpfungspunkt
- Wird eine Mindestkurzschlussleistung gefordert (z. B. bei Röntengeräten)?
- Welche Geräte sollen angeschlossen werden?
- Gewünschte Versorgungszuverlässigkeit (Schutzkonzept, Reservenetzanschluss, ..)
- Kurzschlussleistung aus der Kundenanlage durch Generatoren, Motoren usw.

Geeignete Abhilfemaßnahmen in der Kundenanlage:

- Stern-Dreieck-Anlauf bzw. Sanftanlauf von Motoren
- Gestaffeltes einschalten von Transformatoren und Kondensatorbänken
- Reduzierung der Blindleistungskomponente durch Blindstromkompensation
- Erhöhung der Kurzschlussleistung im kundeneigenen Netz, z.B. durch Parallelschaltung von Transformatoren oder Zuschaltung von Speichern oder Erzeugungsanlagen
- Einsatz von Strombegrenzungsdrosseln im kundeneigenen Netz
- Entkopplung von Quelle und Senke zur Vermeidung des Spannungseinbruchs für den zu schützenden Stromkreis mit Geräten geringerer Störfestigkeit (Bild 9).

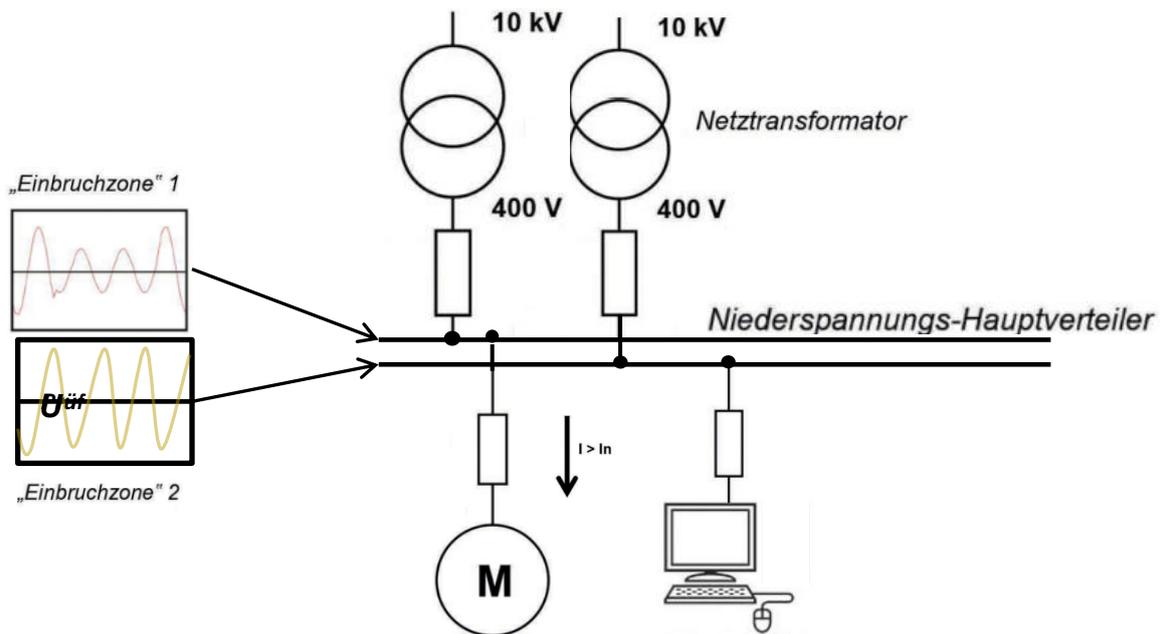


Bild 9: Entkopplung von Störquelle und Störsenke

7.2 Durch Netzstörungen verursachte Spannungseinbrüche

Einflussfaktoren auf die Häufigkeit der (kritischen) Spannungseinbrüche:

- Nicht beeinflussbar (s. Abschnitt 5.1):
 - Atmosphärische Einwirkungen (z.B. Gewitter mit Blitzschlag in Betriebsmittel, Sturm)
 - Fremde Einwirkung (Vögel in einer Freileitung, Erd- und Baggerarbeiten mit Beschädigung eines Kabels, ...)
 - Sonstige Einwirkungen, z.B. Vorbeschädigungen von Kabeln durch Bauarbeiten, Produktions- und Montagefehler sowie Betriebsmittel-Defekte, die zu einem technischen Versagen führen.
- Beeinflussbar:
 - Kurzschlussleistung an den Verknüpfungspunkten
 - Wartung und Instandhaltung des Netzes und des Netzschutzes
 - Verkabelungsgrad insbesondere im MS-Netz
 - Sternpunktbehandlung (z. B. RESPE, NOSPE).

Maßnahmen, die primär aus anderen Gründen im Netz sinnvoll sind aber zugleich auch einen Beitrag zur Verminderung der Dauer und der Tiefe von Spannungseinbrüchen leisten:

- Eine Erhöhung der Kurzschlussleistung im Netz verringert die Einbruchtiefe bei Fehlern im gleichen oder nachgelagerten Netz aus Sicht des betrachteten Kundenanschlusses (z.B. Verringerung von $Z_{k, \text{Netz}}$ in Bild 5, Fälle ②③)
- Eine zur Erzeugung übersichtlicher Netzstrukturen oder aus Kurzschlussfestigkeitsgründen motivierte Entmaschung von Netzen kann die Spannungseinbruchstiefe von Kurzschlüssen verringern (Bild 5, Fall ④).

- Die schnelle selektive Abschaltung des Kurzschlussstromes durch Einsatz von Differentialschutz bzw. gerichtetem UMZ/Distanzschutz mit Signalvergleich kann zur Verringerung von Einbruchsdauern beitragen.
- Einsatz der Resonanz-Sternpunkt-Erdung (RESPE) verhindert primär Versorgungsunterbrechungen und verursacht keinen Spannungseinbruch im unterlagerten Netz.
- Begrenzung des Erdschlussstromes bei der niederohmigen Sternpunktterdung (NOSPE) und damit Verringerung der Einbruchtiefe (auf der NS-Seite bei einpoligen MS-Fehlern).

Maßnahmen durch die Änderung der Sternpunktbehandlung können bei einem Anschluss im Netz eines Netzbetreibers oftmals nicht genutzt werden, da die Sternpunktbehandlung bei einem Netzbetreiber meist für komplette Spannungsebenen umgesetzt wird und eine Änderung für einzelne Anschlüsse nicht möglich ist.

Eine Erhöhung der Kurzschlussleistung vermindert die Höhe des Spannungseinbruches, kann aber den Einbruch nicht vermeiden. Ähnlich verhält es sich mit den Maßnahmen durch Schutzgeräte oder auch durch den Einsatz von Strombegrenzungsdröseln. Diese Maßnahmen sind im Bereich des Netzbetreibers möglich, allerdings ist eine Verlagerung des Schutzes vor Spannungseinbrüchen in eine vorgelagerte Spannungsebene sehr kostenintensiv, da dieser Schutz für eine entsprechend große Anzahl von Kundenanschlüssen ausgelegt werden muss.

7.3 Auslegung des Netzschutzes

Nachfolgend wird hier unter dem Begriff „Netzschutz“ sowohl der Schutz im öffentlichen Netz des Netzbetreibers als auch im Netz des Anlagenbetreibers verstanden. Der Netzschutz wird grundsätzlich schnell, sicher und selektiv ausgelegt. Die Netzschutz-Konzepte der Kundenanlagen sowie des vorgelagerten Netzes müssen zwischen den Parteien abgestimmt sein, da sich die 3 vorgenannten Ziele nie gleichzeitig maximieren lassen. Aus Sicht des Spannungseinbruchs ist eine möglichst schnelle Schutzauslösung wünschenswert, damit die Dauer des Einbruchs reduziert wird. Gleichzeitig bringt eine schnelle Auslösung eine geringere Selektivität mit sich, da weniger Zeit zur Lokalisierung des Fehlers zur Verfügung steht. Somit wären mehr Kunden als notwendig von einer anschließenden Versorgungsunterbrechung betroffen, was für die Summe der Kunden nachteilig ist. Eine schnelle und selektive Auslösung ließe sich z.B. durch einen flächendeckenden Distanzschutz (innerhalb und außerhalb der Kundenanlage), sowie zusätzliche Schaltstellen realisieren, was den Netzschutz extrem verteuern würde. Dabei ist zu beachten, dass selbst beim Distanzschutz eine Schaltzeit von rd. 100ms aus technischen Gründen bestehen bleibt. Da die allermeisten Kunden keinen Nutzen davon hätten, ist ein solches Konzept nur in speziellen Ausnahmefällen sinnvoll. Aufgrund des Grundsatzes der Gleichbehandlung sowie des effizienten Netzbetriebs hat sich eine zeitliche Staffelung der Schutzauslösung herauskristallisiert, die zu den in der Tabelle 3 genannten Fehlerklärungszeiten führt.

Der Netzschutz hat primär die Aufgabe die Auswirkungen eines Defekts an einem Netzelement auf den Netzbetrieb zu begrenzen und die Störung nicht unmittelbar betroffener Teile auf ein möglichst geringes Maß zu beschränken. Darüber hinaus ist es möglich durch den geschickten Einsatz von Netzschutztechnik (Netzschutzkonzept) die Stör-Auswirkungen von unvermeidbaren Spannungseinbrüchen zu vermindern.

Mit diesen Forderungen ist besonders das Kriterium Selektivität, das heißt die eindeutige Feststellung des vom Fehler betroffenen Netzteils und dessen alleinige Abschaltung, verknüpft.

Um die Auswirkungen eines Fehlers auf ein Netz möglichst gering zu halten, muss der Schutz schnellstmöglich wirksam werden. Diese Eigenschaft hat den gewünschten Nebeneffekt, dass die zerstörenden Auswirkungen hoher Fehlerströme und Lichtbogen verringert werden. Der Grundgedanke des Netzschutzes ist es, das Vorhandensein eines Fehlers durch die dann bestehenden anormalen elektrischen Zustände zu erkennen und darüber hinaus festzustellen, an welchen Stellen des Netzes zweckmäßig abzuschalten ist. Kurzschlüsse und Erdschlüsse sind die Fehler, für die der Schutz vorgesehen werden muss. Charakteristisch für diese Störungen sind hauptsächlich:

- Überstrom;
- Zusammenbruch und Verlagerung der Spannungen;
- Die Schutzfunktion beruht auf der Feststellung und Auswertung dieser Größen. Überstrom und Spannungsveränderungen treten jedoch nicht nur in unmittelbarer Nähe der Fehlerstelle sondern auch in weiten Bereichen des Netzes oder im gesamten Netz auf. Es genügt deshalb nicht immer, allein diese Größen zu messen, um entscheiden zu können, ob ein Relais, das auf diese Größen anspricht, abschalten soll oder nicht. Üblicherweise müssen noch zusätzliche Auswahlkriterien eingeführt werden, um über die bestimmungskonforme Abschaltung entscheiden zu können. Zu diesen Zusatzgrößen gehören vor allem:
 - Zeit und
 - Energie- oder Stromrichtung.

Der Aufwand, der mit der Forderung nach Selektivität verknüpft ist, hängt stark vom Aufbau des zu schützenden Netzes ab und wird in der Regel umso grösser, je komplizierter dieses aufgebaut ist.

7.3.1 Schutzgeräte für elektrische Netze

Die Geräte des Netzschutzes haben die Aufgabe, einen Kurzschluss im elektrischen Netz möglichst rasch und selektiv abzuschalten. Bereits bei der Netzauslegung achtet der Netzbetreiber im Eigeninteresse darauf, dass die thermischen Belastungsgrenzen (Kombination aus Kurzschlussstrom und –dauer) seiner Betriebsmittel eingehalten werden sowie auch der Netzstabilität. Die Sicherung der Netzstabilität basiert auf einer Forderung gemäß den Europäischen NetworkCodes zum Schutz von Kundenanlagen, insbesondere von Kraftwerken.

Nach Schalterauslösung durch den Schutz sollen möglichst alle nicht betroffenen Betriebsmittel und Verbraucher ohne Einschränkung weiterversorgt werden.

Für die elektrische Energieverteilung stehen beispielsweise folgende Schutzgeräte zur Verfügung:

- Überstromzeitschutz
- Distanzschutz
- Leitungs-Differentialschutz
- Transformator-Differentialschutz
- Sammelschienen-Differentialschutz
- Maschinenschutz.

Die Auslegung des Netzschutzes wird unter Beachtung der Netzstabilität, Reserveschutzfunktion, Selektivität und einem effizienten Netzbetrieb bestimmt.

Da die Schutzgeräte im Gegensatz zu Messinstrumenten nur im Störfall auslösen, ist ihre Funktionsbereitschaft gerade in diesen wenigen Augenblicken von entscheidender Bedeutung – sie sollen daher generell folgende Eigenschaften aufweisen:

- hohe Ausfallsicherheit,
- hohe Störsicherheit und Genauigkeit der zu messenden Größen,
- schnelle Anrege-, Rückfall- sowie Auslösezeiten.

Um die Betriebsbereitschaft zu gewährleisten, ist es empfehlenswert, dass die Schutzgeräte eine interne Selbstüberwachung einschließlich der Kommandorelais besitzen, die eine Störung sofort melden.

Da die Schutzgeräte nur eine, wenn auch wichtige Funktion in einem Schutzkonzept darstellen, müssen die verschiedenen Komponenten in bestimmten Wartungsintervallen überprüft werden.

7.3.2 Blitzschutz

Da die atmosphärischen Einflüsse, wie Gewitter, zu örtlich und zeitlich unvorhersehbaren Störungsereignissen und somit zu Spannungseinbrüchen führen können, kommt einem geeigneten Blitzschutz große Bedeutung zu.

Der äußere Blitzschutz bietet Schutz gegen Auswirkungen direkter Blitzeinschläge. Er besteht aus Fangeinrichtungen, Ableitungsanlage und Erdungsanlage. Im Idealfall stellt der äußere Blitzschutz einen Faradayschen Käfig dar.

Blitzeinschläge können nicht verhindert werden. Dem Blitz können aber Ziele angeboten werden, die einem Einschlag standhalten. Fangeinrichtungen sind Stangen, Drähte, Seile oder Metallteile der zu schützenden Anlage, die für Einschläge vorgesehen sind. Alle Stellen der Anlage, die für einen direkten Blitzeinschlag in Frage kommen, müssen mit Fangeinrichtungen versehen werden. Sie müssen untereinander und auf kurzem Weg mit der Ableitungsanlage verbunden werden.

Die Auswirkungen von Blitzeinschlägen sind aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht vollständig auszuschließen.

Blitzschutzseile und Blitzschutzstangen werden im Allgemeinen auf den Abspannportalen der Sammelschienen und Freileitungen angeordnet.

Blitzschutzseile ankommender Freileitungen enden an den Abspanngerüsten der Freiluftschaltanlage.

7.4 Mögliche Abhilfe-Maßnahmen in der Kundenanlage

Allgemein mögliche Abhilfe-Maßnahmen in der Kundenanlage zur Verminderung der Auswirkungen von Spannungseinbrüchen sind z.B.:

- Es sollten Geräte eingesetzt werden, die über eine ausreichende Störfestigkeit verfügen. Eine CE-Kennzeichnung ist hierfür nicht ausreichend. Wichtig ist z.B. nach welcher Norm die Geräte geprüft wurden und welche Parameter jeweils geprüft wurden.

- Für sensible Sensoren oder Aktoren können gepufferte Systeme eingesetzt werden. In vielen Fällen sind auch Automaten oder Maßnahmen in der Leittechnik z.B. Totzeiten, Umschaltungen oder Wiederanlaufprozeduren der Produktionsanlage hilfreich.

Bei Anschluss großer Umrichter oder sensibler Verbraucher sollte der Netzbetreiber bereits in der Planungsphase eingebunden werden.

7.4.1 Spezifische Abhilfe-Maßnahmen in der Kundenanlage

Spezifische Abhilfe-Maßnahmen in der Kundenanlage zur Verminderung der Auswirkungen von Spannungseinbrüchen sind z.B.:

- Schnelles Ausregeln von netzseitigen Spannungseinbrüchen, z.B. mit aktivem Spannungsregler oder Dynamic Voltage Restorer (DVR);
- Netzanschlusspunkt von spannungssensiblen Anlagen und Geräten prüfen;
- Frequenzumrichter mit EMV-Filter, Netzdrossel am Ausgang um Netzurückwirkungen zu reduzieren.

7.4.2 Maßnahmen gegen Spannungseinbrüche

In der Tabelle 8 sind mögliche Abhilfe-Maßnahmen bei verschiedenen Unterbrechungsdauern angegeben.

Tabelle 8: *Mögliche Abhilfe-Maßnahmen bei verschiedenen Unterbrechungsdauern*

Unterbrechungsdauer	Problem	Maßnahme
< 500 ms (alternative Unterscheidung: Schnellzeit / Schutzlaufzeit MS / Unterbrechung)	Kritisch für alle Leistungselektroniken und Mikro-Prozessor gesteuerten Geräte	z.B. Netzteile mit entsprechender Geräte- interner Spannungspufferung einsetzen
0,5 s – 30 min	Spannungsabweichungen, die auch robuste Geräte beeinträchtigen	Dynamische USV-Anlagen ab 200 kVA, 0 – 15 s; USV-Anlagen 5 - 200 kVA, 0 – 15 min
> 30 min	Produktionsstillstand bei längerem Ausfall	Ersatzstromaggregat

7.4.3 Prozessoptimierung

Im Rahmen einer Prozessoptimierung sind insbesondere folgende Abhilfe-Maßnahmen in der Kundenanlage zur Verminderung der Auswirkungen von Spannungseinbrüchen zu beachten:

- Geräte mit Unterspannungsauslösung: Einstellung prüfen, Auslöseverzögerung optimieren (150 - 200 ms oft ausreichend, aber von der Ursache abhängig)
- Geräte mit Überspannungsauslösung: Einstellung prüfen, Spannungsschwelle optimieren (mit Zunahme dezentraler Erzeugung wird vermehrt die obere Spannungstoleranz verwendet, daher sind frühere Einstellungen ggf. nicht mehr zeitgemäß)
- SPS- Steuerungen und Leitsysteme absichern durch USV

- EMV gerechte Installation zur Vermeidung von Strömen über galvanische Verbindungen oder elektromagnetische Einkopplungen (ansonsten können Störungen an elektronischen Komponenten auftreten)
- Auf vollständigen Potentialausgleich achten und nur TN-S Netze installieren
- Blitz- und Überspannungsschutz installieren
- Bei sensiblen Anlagen im Vorfeld mit dem zuständigen Netzbetreiber Kontakt aufnehmen (Netzverhältnisse klären, Netzanschlusspunkt festlegen, Historie auswerten, Konformität prüfen)

7.4.4 Bilaterale Vereinbarungen

Bei Bedarf können bilaterale Vereinbarungen zwischen Anlagen- und Netzbetreiber zur Art des Netzanschlusses sinnvoll sein, wie z.B. Netzanschluss an eine andere Netzebene oder über eine eigene Transformator-Station.

8 Zusammenfassung

Die wesentlichen Aussagen des vorliegenden FNN-Hinweises lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das Auftreten von Spannungseinbrüchen in elektrischen Netzen ist nicht vermeidbar, ggf. unter bestimmten Nebenbedingungen reduzierbar.
- Netzbetreiber können aufgrund der großen Stochastik der Ereignisse im Netz, die zu einem Spannungseinbruch führen, nur sehr begrenzt vorbeugende und vom Aufwand her gerechtfertigte Maßnahmen ergreifen.
- Netzseitig sind Auftreten und Auswirkungen von Spannungseinbrüchen teilweise beeinflussbar. Allerdings müssen die wesentlichen beeinflussenden Parameter Netztopologie und Schutzkonzept vor allem anderen Auslegungskriterien folgen. Zudem stehen Häufigkeit, Tiefe, Dauer und Betroffenheit von Spannungseinbrüchen in gegenseitiger Abhängigkeit und können nur in bestimmten Grenzen beeinflusst werden.
- Der Netzbetreiber ist zum wirtschaftlichen und diskriminierungsfreien Netzanschluss verpflichtet. Das bedeutet, dass alle über das Qualitätsniveau gemäß DIN EN 50160 hinausgehende Netzmaßnahmen für Sonderanforderungen einzelner Kunden kostenneutral zu erfolgen sind und nicht durch die Gesamtheit der Kunden zu bezahlen sind.
- Die historische Entwicklung der auf die Stromkreislängen bezogenen Häufigkeit von Netzkurzschlüssen als wesentliche Ursache netzseitiger Spannungseinbrüche zeigt eine rückläufige Tendenz.
- Ursachen für die Wahrnehmung zunehmender Gerätestörungen sind vor allem in Technologieverschiebungen auf der Geräteseite zu suchen. Auslöser ist die technische Auslegung, da moderne Geräte in ihren Netzteilen zunehmend reine Leistungselektronik statt Transformatoren und Glättungskondensatoren verwenden. Dies bietet i.A. mehr Funktionalität zu geringeren Kosten, ist aber anfälliger gegen Spannungseinbrüche, da die kurzzeitige Energiespeicherfunktion der vorgenannten Bauteile fehlt.
- Die in der Normung für Störfestigkeit der Geräte zugrunde gelegten Spannungseinbrüche umfassen nicht alle im realen Netzbetrieb auftretenden Spannungseinbrüche.
- Eine Störfestigkeit gegen tiefe Spannungseinbrüche wird von den Normen nur für eine Dauer bis 10 ms (für IT-Produkte) bzw. 20 ms (für sonstige Geräte im Wohn-, Gewerbe- und Industriebereich) gefordert.
- Für Geräte im Industriebereich gelten strengere Grenzwerte für die Störfestigkeit als für Geräte im Wohn-, Geschäfts- und Gewerbebereich sowie Kleinbetriebe hinsichtlich der Dauern von Spannungseinbrüchen zwischen 20 und 200 ms, die ohne Fehlfunktion oder gar Ausfall überstanden werden müssen.
- In der Normung werden nicht die Anforderungen zur Beherrschung aller möglichen auftretenden Spannungseinbrüche beschrieben, sondern Grenzwerte im Sinne eines ausgewogenen Aufwand/Nutzen-Verhältnisses bei allen betroffenen Akteuren definiert.
- Eine Auslegung der Geräte ausschließlich nach der Normstörfestigkeit führt bei jedem tieferen Spannungseinbruch am Geräteanschluss infolge eines Netzkurzschlusses zu einer Fehlfunktion oder gar Ausfall.

- Geräte/Anlagen, die für breite Anwendungen konzipiert sind, können spezielle Anforderungen im Einzelfall ggf. nicht abdecken. Für spezielle Kundenanforderungen sind die von Geräten/Anlagen eingehaltenen normativen Anforderungen zu hinterfragen und zu prüfen, ob diese für den konkreten Anwendungsfall ausreichend sind. Bei Bedarf sind unter Beachtung einer Aufwand/Nutzen-Betrachtung vom Betreiber der Kundenanlage höhere Störfestigkeitsanforderungen an bestimmte Geräte/Anlagen zu stellen und entsprechend einzubauen.
- In der Regel sind gezielte lokale Maßnahmen innerhalb der wenigen sensiblen Kundenanlagen die technisch und volkswirtschaftlich sinnvollste Lösung. Dabei zeigt die Erfahrung, dass in bestehenden Anlagen häufig bereits eine gezielte Prozessoptimierung ausreichend ist.
- Eine genaue Problem-/Störungsanalyse in bestehenden Anlagen ist im Sinne der Qualitätssicherung zu empfehlen, auch periodisch wiederholend.
- Bei neu konzipierten Anlagen ist im Sinne einer Prozessoptimierung eine enge Abstimmung zwischen Anlagenbetreiber und Netzbetreiber erforderlich – sowohl in der Planungsphase als auch Betriebsphase der Kundenanlage.

Literaturverzeichnis

- [1] VDE|FNN Versorgungszuverlässigkeit und Spannungsqualität in Deutschland – Fakten, vom 11.03.2013
- [2] VDE|FNN FNN-Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik – Berichtsjahr 2014
- [3] Weck, K.-H. Versorgungsqualität im Spiegel der Normen, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 100 (2001), Heft 9, S. 34-38
- [4] CSRES, VDN, VEÖ, VSE Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen, 2. Ausgabe 2007
- [5] SEMI F47-0706: Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity (SEMI: Internationaler Branchenverband der Halbleiterindustrie)
- [6] ITIC ITI-Kurve (ITIC, amerikanisches Information Technology Industry Council)
- [7] VDE|FNN FNN-Hinweis: Leitfaden zum Einsatz von Schutzsystemen in elektrischen Netzen, Ausgabe September 2009

Anhang A: Beispiele für die Kundenseite

A1 Produktionsbetrieb mit hohem Automatisierungsgrad

In einem Produktionsbetrieb mit hohem Automatisierungsgrad kam es durch Spannungseinbrüche im vorgelagerten HS-/ HöS-Netz wiederholt zu Produktionsausfällen. Nach Analyse der Zusammenhänge und Abhängigkeiten innerhalb der Produktion, sowie der Auswirkungen von kurzen Spannungseinbrüchen wurden folgende Maßnahmen empfohlen:

Tabelle 9: Produktionsbetrieb mit hohem Automatisierungsgrad: Gegenüberstellung der Situationen vor und nach der Umsetzung geeigneter Abhilfe-Maßnahmen zur Vermeidung von Produktionsausfällen

Vorher	Nachher
Nur wenige Geräte mit Batteriepufferung	Einsatz dynamischer USV-Anlagen, Verbraucher wurden dabei prozessorientiert gruppiert
Keine Rückmeldeinformation über den Status der Energieversorgung	Visualisierung von Unterbrechungen der Energieversorgung im Leitsystem
Nach Ausfall von Steuerungen und Antrieben mussten diese händisch wieder zugeschaltet und angefahren werden	Hinterlegung automatischer Wiederanlaufprozeduren von Antrieben im Prozessleitsystem
Aufteilung der elektrischen Netzeinspeisungen nicht durchgängig am Prozess orientiert	Verbraucher wurden nach Produktionsanlagen und Verfahrensabschnitten zugeordnet, Aufbau von Redundanzen oder Verbrauchern mit A-B Prinzip
Einsatz von Frequenzumrichtern mit Standardparametern	Festlegung von (Spannungs-) Anforderungsprofilen für eingesetzte Frequenzumrichter

A2 Auslösungen des kundeneigenen Leistungsschalters

In einem Betrieb kam es mehrfach zu Auslösungen des kundeneigenen Leistungsschalters, ohne dass ein Fehler im Kundennetz vorlag. Durch genaue Dokumentation der Zeitpunkte, konnten Fehler im vorgelagerten MS-Netz (bzw. die durch sie verursachten Spannungseinbrüche) als Ursache ausgemacht werden. Es zeigte sich, dass die Einstellung der Schutzauslösezeiten nicht optimal war.

Tabelle 10: *Auslösungen des kundeneigenen Leistungsschalters: Gegenüberstellung der Situationen vor und nach der Umsetzung geeigneter Abhilfe-Maßnahmen zur Vermeidung von Auslösungen des kundeneigenen Leistungsschalters*

Vorher	Nachher
Standardmäßig eingestellter Unterspannungsschutz	Nach Rücksprache mit dem Netzbetreiber wurde der Unterspannungsschutz von 300ms Einstellwert auf 450ms gemäß Schutzstaffelkurve für den betreffenden Netzabschnitt eingestellt
Alter Einstellwert von 103% für den Überspannungsschutz vor dem Zubau von Windkraft in der Umgebung war ausreichend und funktionierte.	Durch Ausnutzung der oberen Spannungstoleranz kommen nun auch höhere Spannungen vor. Eine Umstellung auf 110% hat keine Nachteile, verhindert aber unnötige Abschaltungen

A3 Totalausfall der Bürokommunikation

In einem Betrieb, der über mehrere Büroräume, einige Antriebe sowie einen schweren Hebekran verfügt, kam es unter bestimmten Bedingungen (hohe Kranlast) zu einem Totalausfall der Computer und anderen Geräten in den Büros und somit zu unkontrollierten Systemabstürzen. Der Anlaufstrom des Krans führt je nach Last und aktueller Dämpfung des Werksnetzes zu einem mehr oder weniger tiefen Spannungseinbruch, der die Funktion der Geräte beeinträchtigt.

Tabelle 11: *Totalausfall der Bürokommunikation: Gegenüberstellung der Situationen vor und nach der Umsetzung geeigneter Abhilfe-Maßnahmen zur Begrenzung des Anlaufstroms eines Krans*

Vorher	Nachher
Hoher Anlaufstrom (mehrfacher Nennstrom) des Krans	Ausrüstung des Krans mit einer elektronischen Sanftanlauf-Einrichtung. Somit treten nur noch sehr geringe, unkritische Spannungseinbrüche auf.
Die verwendeten Desktop-PCs zeigen eine hohe Störanfälligkeit gegen Spannungseinbrüche aufgrund	Durch die Nutzung von Laptops (mit automatischer Batteriepufferung) haben auftretende Spannungseinbrüche keine Auswirkung mehr auf die Büro-PCs (als wichtigste Geräte).

A4 Netzurückwirkungen im restlichen Netz

In einem holzverarbeitenden Betrieb am Ende einer langen, alten Freileitung kam es zu einer großen Zahl von Spannungseinbrüchen, überwiegend durch Witterungseinflüsse. Durch

sukzessive Erhöhung der Leistung nahmen auch die wahrnehmbaren Spannungseinbrüche durch Netzurückwirkungen (Anlaufströme der Sägen) im restlichen Netz zu. Ein Kabel zwischen Kunde und Ortsnetzstation sorgt in diesem Fall für Abhilfe

Tabelle 12: Netzurückwirkungen im restlichen Netz: Gegenüberstellung der Situationen vor und nach der Umsetzung geeigneter Abhilfe-Maßnahmen zur Begrenzung der Netzurückwirkungen

Vorher	Nachher
Anschluss am Ende einer langen Freileitung mit weiteren Kunden auf der gleichen Leitung mit hohem Störungsaufkommen	Die Verkabelung führt zu mehr Kurzschlussleistung beim Kunden und zu einer Unempfindlichkeit gegen wetterbedingte Spannungseinbrüche. Die zusätzlichen Spannungseinbrüche aufgrund der Netzurückwirkungen des Betriebs sind für die anderen Kunden erheblich reduziert worden.

Anhang B: Beispiele für die Netzseite

Bei Kundenanlagen, die über eigene Leistungsschalter (und damit über einen parametrierbaren Schutz) verfügen, sollten die Schutzeinstellungen regelmäßig geprüft und den Netzverhältnissen angepasst werden. So können eine Reihe negativer Auswirkungen von Spannungseinbrüchen von vornherein vermieden werden.

- **Unterspannungsschutz:** Die typische Fehlerklärungszeit hängt vom Schutzverfahren, bzw. der zugeteilten Staffelzeit ab, ebenso ob die Anschlussleitung mit einer AWE ausgerüstet ist.
- **Überspannungsschutz:** In vielen Kundenanlagen ist der Überspannungsschutz zu empfindlich eingestellt, da früher keine nennenswerten Überschreitungen der Nennspannung (bei Betriebsfrequenz) auftraten. Mit der weiten Verbreitung dezentraler Erzeugungsanlagen im MS-Netz (meist Windkraft), wird aber zunehmend auch die obere Spannungstoleranz im normalen Betrieb ausgenutzt. Insofern ist auch der Überspannungsschutz entsprechend auszuliegen, um unnötige Abschaltungen zu vermeiden.
- **USV-Anlagen:** Wird in Kundenanlagen eine USV-Anlage eingesetzt, ist zwingend darauf zu achten, dass die Ansprechzeit der USV-Anlage mit der Schutzeinstellung des eigenen Leistungsschalters harmoniert. Es muss sichergestellt sein, dass entweder der Leistungsschalter am Netz bleibt oder die USV-Anlage übernimmt. Grundsätzlich ist es sinnvoll und auch kostengünstiger, nur die sensiblen Bereiche einer Kundenanlage mit einer USV-Anlage auszurüsten.
- **Erhöhung der Kurzschlussleistung:** Bei entfernten Fehlern (etwa im benachbarten MS-Abgang) führt eine erhöhte Kurzschlussleistung am Anschlusspunkt des Kunden, zu einem geringeren Spannungseinbruch. Befindet sich der Fehler allerdings auf der direkten Zuleitung oder im vorgelagerten Netz, bringt eine höhere Kurzschlussleistung keinen Vorteil. Somit ist ein Schutz vor Spannungseinbrüchen durch erhöhte Kurzschlussleistung nur sehr bedingt gewinnbringend, dafür aber mit hohen Kosten verbunden.

Befindet sich ein Kunde jedoch an einer schwachen Ausläuferleitung, so können bereits Betriebsströme normaler Geräte entsprechende Spannungseinbrüche hervorrufen. In diesem Fall ist die Erhöhung der Kurzschlussleistung eine sinnvolle Maßnahme. Im Fehlerfall kommt es aber dennoch zu entsprechenden Spannungseinbrüchen.

Im Bild 10 ist ein typisches MS-Netz mit verschiedenen möglichen Fehlerstellen abgebildet.

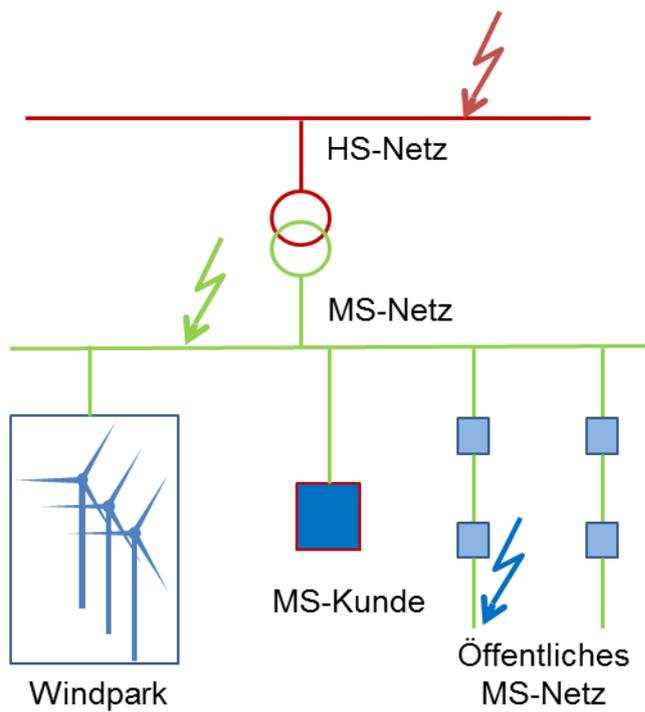


Bild 10: Typisches MS-Netz mit verschiedenen möglichen Fehlerstellen