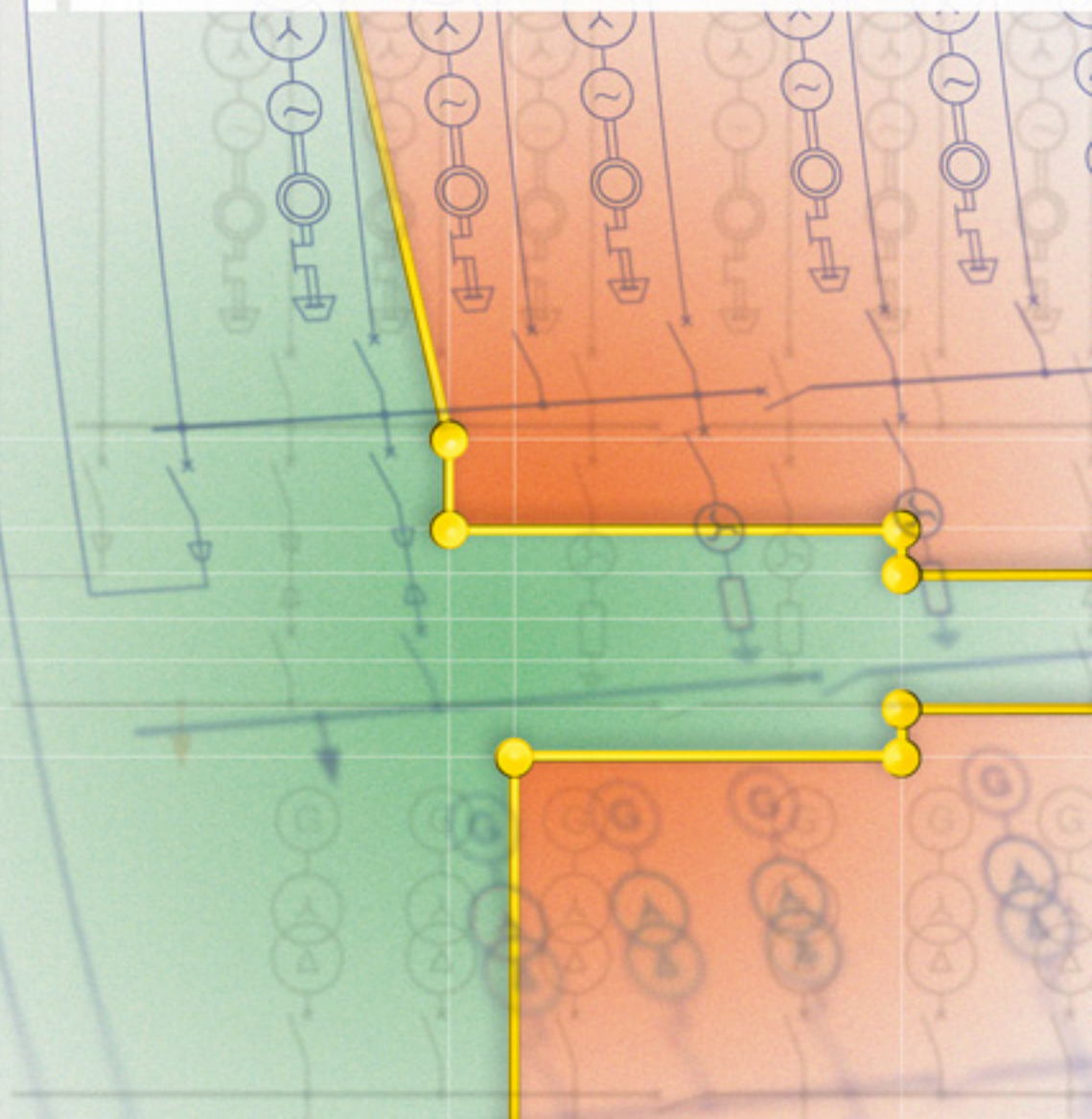


Hartmut Kiank, Wolfgang Fruth

Planungsleitfaden für Energieverteilungs- anlagen

Konzeption, Umsetzung und
Betrieb von Industrienetzen

SIEMENS



Kiank/Fruth
Planungsleitfaden für Energieverteilungsanlagen



Dr.-Ing. Hartmut Kiank, Jahrgang 1952, ist Principal Expert für Power Distribution Solutions im Siemens-Sektor Energy. In dieser fachlichen Führungsposition beschäftigt er sich mit der Planung und Projektabwicklung öffentlicher und industrieller Stromversorgungsanlagen. Er ist Mitglied des VDE und Autor zahlreicher Fachartikel und Berichte (CIRED, ICEE). Sein „etz“-Aufsatz „EMV und Personenschutz in mehrfachgespeisten Industrienetzen“ wurde in das „VDE-Jahrbuch Elektrotechnik 2007“ aufgenommen.



Dipl.-Ing. Wolfgang Fruth, Jahrgang 1966, ist Projektierungsingenieur und Consultant Support für Totally Integrated Power im Siemens-Sektor Industry. Er ist Mitentwickler der Netzberechnungs- und Dimensionierungssoftware „SIMARIS design“ und Autor verschiedener Fachveröffentlichungen.

Planungsleitfaden für Energieverteilungsanlagen

Konzeption, Umsetzung und Betrieb
von Industrienetzen

von Hartmut Kiank und Wolfgang Fruth

Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Autoren und Verlag haben alle Texte in diesem Buch mit großer Sorgfalt
erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht ausgeschlossen werden. Eine Haftung
des Verlags oder der Autoren, gleich aus welchem Rechtsgrund, ist ausgeschlossen.
Die in diesem Buch wiedergegebenen Bezeichnungen können Warenzeichen
sein, deren Benutzung durch Dritte für deren Zwecke die Rechte der
Inhaber verletzen kann.

www.publicis.de/books

ISBN 978-3-89578-359-3

Herausgeber: Siemens Aktiengesellschaft, Berlin und München
Verlag: Publicis Publishing, Erlangen
© 2011 by Publicis KommunikationsAgentur GmbH, GWA, Erlangen

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.
Jede Verwendung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes
ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt
insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen,
Bearbeitungen sonstiger Art sowie für die Einspeicherung und Verarbeitung
in elektronischen Systemen. Dies gilt auch für die Entnahme von einzelnen
Abbildungen und bei auszugsweiser Verwendung von Texten.

Printed in Germany

Geleitwort

Der Markt hat sich gewandelt, Anlagen für die Stromversorgung sind heute komplexer, haben eine Vielzahl von technischen Komponenten und einen hohen Automatisierungsgrad. Normen und Vorschriften sind weltweit strikt einzuhalten. Die funktionsgerechte und zuverlässige Ausführung von Energieverteilungsanlagen für Industrie und Energieversorgungsunternehmen wird ohne Einschränkung gefordert. Die herausragende Qualität unserer Produkte ist in entsprechenden Systemen und Lösungen zu integrieren. Dazu sind Prozesskenntnisse und Expertenwissen nötig. Sie sind die entscheidenden Erfolgsfaktoren, um Kundenzufriedenheit und Geschäftserfolg sicherzustellen.

Die Verfasser haben mit diesem Planungsleitfaden ein praxisbezogenes Dokument für Ingenieure und Techniker der Energiewirtschaft erstellt. Zusätzlich möchten wir damit Planungsbüros in der täglichen Arbeit unterstützen. Studenten und Hochschulabsolventen erhalten mit diesem Leitfaden eine Unterstützung für den erfolgreichen Start ins Berufsleben.

Ich möchte Herrn Dr. Kiank und seinem Co-Autor meinen Dank und Anerkennung für die geleistete Arbeit aussprechen. Sie haben in exzellenter und verständlicher Weise umfangreiches Fachwissen des Business-Segments Power Distribution Solutions im Siemens-Sektor Energy zusammengetragen und beschrieben.

Erlangen, im Oktober 2010
Manfried Kruska

Vorwort

Industrielle Verteilungsnetze müssen die Gewähr bieten, dass die von ihnen mit Elektroenergie versorgten produktions- und verfahrenstechnischen Prozesse energieeffizient, zuverlässig und in höchster Qualität ablaufen können. Diesem Anspruch werden nur Industrienetze gerecht, die aufgrund der getroffenen Planungsentscheidung alle prozessabhängigen Anforderungen hinsichtlich Leistungsbedarf, Versorgungszuverlässigkeit und Spannungsqualität technisch und wirtschaftlich optimal erfüllen. Planungsentscheidungen zur Netzgestaltung, -bemessung und -betriebsweise sind aufgrund ihrer Vielschichtigkeit und komplexen Auswirkungen auf die Versorgungsqualität und Energieeffizienz besonders verantwortungsvoll und umsichtig zu treffen. Dies ist immanent wichtig, weil die wirklichen technischen Risiken oftmals in der Tiefe der zu lösenden Versorgungsaufgabe versteckt sind. Bei gleichzeitiger Nutzung von Kostensenkungspotentialen lassen sich technische Risiken nur durch planerische Lösungskompetenz, d. h. durch vorhandene Prozesskenntnisse und branchentechnologisches Wissen, netz- und anlagentechnisches Know-how, tiefe Produktkenntnisse sowie dezidiertes Wissen über einzuhaltende Normen und Standards vermeiden.

Dem entsprechend, soll mit dem vorliegenden Planungsleitfaden versucht werden, die in langjähriger Praxis erworbene Lösungskompetenz zur prozessabhängigen Gestaltung, Bemessung und Betriebsweise sicherer und energieeffizienter Industrienetze auf einfache und verständliche Weise weiterzuvermitteln. Nach Darstellung relevanter Planungsgrundlagen im Teil A werden in den Teilen B und C Planungsempfehlungen für industrielle Mittel- und Niederspannungsnetze gegeben. Die Planungsempfehlungen geben auch Aufschluss über die anlagen- und schutztechnische Ausrüstung der Netze sowie Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Spannungsebenen (110 kV, MS, NS).

Nicht in jedem Fall sind die Empfehlungen zur Gestaltung und Betriebsweise der Netze sowie zur Auswahl und Parametrierung von Netzschutzeinrichtungen durch Normen und Standards abgesichert. Teilweise sind sie auf langjährige positive Betriebserfahrungen und praxiserprobtes Expertenwissen zurückzuführen. Da die strategische Netzplanung nur bedingt vorschriftenabhängig ist und Planungsvoraussetzungen sehr verschiedenartig sein können, sind bestimmte Empfehlungen dieses Leitfadens mit Ermessensspielräumen behaftet. Es liegt in der Natur der Sache, wenn innerhalb solcher Ermessensspielräume Abweichungen zwischen den Planungsempfehlungen und dem Prozedere in einzelnen Industriebranchen auftreten.

Das Buch wendet sich an Ingenieure und Techniker in der industriellen Energiewirtschaft, in Industrieunternehmen und Planungsbüros. Studenten und Hochschulabsolventen soll es die Einarbeitung in das behandelte Gebiet erleichtern.

Der vorliegende Planungsleitfaden entstand auf Anregung und Idee von Herrn Manfred Kruska, CEO des Business-Segments Power Distribution Solutions im Siemens-Sektor Energy. Für seine Unterstützung bei der Verwirklichung dieses Buchvorhabens bedanke ich mich ganz herzlich. Vielmals bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Fruth für seinen bei der Abfassung von Teil C dieses Leitfadens geleisteten Co-Autorenbeitrag. Besonderen Dank schulde ich Frau Ursula Dorn, die sich bei der elektronischen Aufbereitung des Buchmanuskripts besonders kompetent und engagiert

gezeigt hat. Last not least bedanke ich mich bei Herrn Dr. Gerhard Seifried für die fruchtbare redaktionelle Zusammenarbeit.

Jeder kritische Hinweis zum vorliegenden Planungsleitfaden wird dankend entgegengenommen.

Erlangen, im Oktober 2010

Hartmut Kiank

Inhaltsverzeichnis

A Grundlagen

1 Einführung	13
1.1 Besonderheiten von Industrienetzen	13
1.2 Notwendigkeit netz- und anlagentechnischer Gesamtlösungen	15
1.3 Aufgabe der Netzplanung	16
2 Grundsätzlicher Ablauf einer Planungsaufgabe	19
2.1 Top-down-Prinzip	19
2.2 Ermittlung des bestehenden Netzzustandes	19
2.3 Ermittlung der Anforderungen	22
2.3.1 Leistungsbedarf	22
2.3.2 Versorgungsqualität	24
2.3.2.1 Versorgungszuverlässigkeit	24
2.3.2.2 Spannungsqualität	27
2.4 Ermittlung prozessadäquater Stromversorgungsvarianten	34
2.5 Suche der optimalen Lösung	42
2.5.1 Entscheidungsziele	42
2.5.2 Entscheidungsmethodik	43

B Planungsempfehlungen Mittelspannung

3 Wahl der MS-Netzennspannung	47
3.1 Einspeiseebene	47
3.2 Verteilungsebene	48
4 Bestimmung von Kurzschlussbeanspruchung und erforderlicher Kurzschlussfestigkeit	51
4.1 Wahl der Kurzschlussleistung	51
4.2 Kurzschlussfestigkeit der Betriebsmittel	53
4.2.1 MS-Schaltanlagen	53
4.2.2 MS-Kabel	58
4.2.3 MS-Verteilungstransformatoren	60
5 Festlegung optimaler Netzkonfigurationen für die industrielle Stromversorgung	62
5.1 MS-Verbraucherstruktur in der metallverarbeitenden Industrie	62
5.2 Netztechnisch vorteilhafteste MS/NS-Einspeisevariante	62

5.3 Optimale Netzform für den Anschluss von Transformator-Schwerpunktstationen	63
5.4 Anforderungsgerechte Netzstrukturen und -konzepte für Industriebetriebe ...	67
5.4.1 Kleiner Industriebetrieb	67
5.4.2 Mittlerer Industriebetrieb	69
5.4.3 Große Industriebetriebe	71
5.4.4 Fertigungsstätten von Hochtechnologieunternehmen	78
5.5 Schaltanlagen-Klassifikation für die anlagentechnische Umsetzung der MS-Netzkonzepte	83
6 Wahl der Sternpunktterdung	86
6.1 Bedeutung der Sternpunktterdung	86
6.2 Arten der Sternpunktterdung	86
6.3 Auswahlkriterium und Entscheidungshilfe	106
6.4 Auswahlempfehlung für den Betrieb von MS-Kabelnetzen in der Industrie ...	109
6.5 Beidseitige Erdung der Übergabetransformatoren beim Betrieb von MS-Industrienetzen	110
7 Auslegung des MS-Netzschutzes	113
7.1 Schutz- und gerätetechnische Grundlagen	113
7.2 Schutz von einspeisenden 110-kV/MS-Transformatoren	128
7.3 Schutz von MS-Verteilungstransformatoren	129
7.3.1 Schutz mit Lastschalter-Sicherungs-Kombination	132
7.3.2 Schutz mit Leistungsschalter-Relais-Kombination	146
7.4 Strombegrenzender Kurzschlusschutz von Motoren und Kondensatoren ...	149
7.4.1 Absicherung von HS-Motoren	149
7.4.2 Absicherung von Kondensatoren	153
7.5 Schutz von Sammelschienen	154
7.6 Schutz von Leitungen	155
7.6.1 Schutz bei Doppelstich-Anschluss von Netz-Unterstationen	156
7.6.2 Schutz bei Einschleifung von Netz-Unterstationen	156
7.7 Schutzkonzept für ein fiktives 20-kV-Industrienetz mit niederohmiger Sternpunktterdung	158
C Planungsempfehlungen Niederspannung	
8 Wahl der NS-Netzspannung	160
8.1 Kategorisierung der NS-Ebene als Prozess- und Verbraucherebene	160
8.2 Spannungen für die Prozess- und Verbraucherebene	160
9 Kurzschlussleistung und -ströme im NS-Netz	165
9.1 Maßgebende Fehlerarten und -ströme für die Netz- und Anlagenauslegung ...	165
9.2 Ausnutzung von Betriebsmittelreserven bei der Beherrschung von Kurzschlussströmen	169

10 Anforderungsgerechte Gestaltung des NS-Netzes	172
10.1 Analyse der Verbraucherstruktur	172
10.1.1 Charakteristische Verbraucherguppen in der metallverarbeitenden Industrie	172
10.1.1.1 Werkzeugbau und mechanische Werkstätten	172
10.1.1.2 Stanzereien und Presswerke	176
10.1.1.3 Schweißanlagen	182
10.1.1.4 Lackier- und Härteanlagen	194
10.1.1.5 Beleuchtungsanlagen	195
10.1.1.6 EDV- und IT-Anlagen	198
10.2 Wahl der Netz- bzw. Systemart	201
10.2.1 Normativ in Betracht kommende Systemarten	203
10.2.1.1 IT-System	207
10.2.1.2 TT-System	211
10.2.1.3 TN-System	216
10.2.2 EMV-gerechte TN-Systeme bei Mehrfacheinspeisung	224
10.2.2.1 Zentral-mehrfachgespeistes TN-EMV-System	225
10.2.2.2 Dezentral-mehrfachgespeistes TN-EMV-System	227
10.3 Festlegung der Netzform	229
10.3.1 Netzformen für die Energieeinspeisung und -verteilung	229
10.3.1.1 Einfaches Strahlennetz	229
10.3.1.2 Strahlennetz mit Umschaltreserve	230
10.3.1.3 Strahlennetz im Netzverband	232
10.3.1.4 Mehrstrangig gespeistes Maschennetz	233
10.3.1.5 Mehrfachstrahlennetz mit Schienenverteilern	234
10.3.2 Auswahl der wirtschaftlich und technisch vorteilhaftesten Netzform	235
11 Auswahl und Auslegung der Betriebsmittel	237
11.1 Verteilungstransformatoren	237
11.2 Niederspannungs-Schaltanlagen und -Verteiler	243
11.2.1 Schaltanlage SIVACON S8	248
11.2.2 Installationsverteiler ALPHA 630	254
11.2.3 Isolierstoff-Verteilersystem ALPHA 8HP	255
11.2.4 Schienenverteiler-System SIVACON 8PS	255
11.2.5 Transformator-Schwerpunktstation mit SIVACON S8/8PS	259
11.3 Kabel	262
11.3.1 Zulässige Strombelastbarkeit	262
11.3.2 Schutz bei Überlast	271
11.3.3 Schutz bei Kurzschluss	274
11.3.4 Schutz gegen elektrischen Schlag	279
11.3.5 Einzuhaltender Spannungsfall	282
11.3.6 Dimensionierungsbeispiel	289
12 Blindleistungskompensation	296
12.1 Technische und wirtschaftliche Begründung der Kompensation	296
12.2 Kompensation bei Betrieb linearer Verbraucher	296
12.2.1 Bestimmung der erforderlichen Kondensatorleistung	297
12.2.2 Arten der Blindleistungskompensation	301

12.2.2.1 Einzelkompensation	301
12.2.2.2 Gruppenkompensation	302
12.2.2.3 Zentralkompensation	302
12.2.2.4 Gemischte Kompensation	304
12.2.3 Wahl der vorteilhaftesten Kompensationsart	304
12.2.4 Blindleistungskompensation bei Drehstrom-Asynchronmotoren und Verteilungstransformatoren	305
12.2.4.1 Drehstrom-Asynchronmotoren	305
12.2.4.2 Verteilungstransformatoren	308
12.2.5 Anschluss und Betrieb regelbarer Kompensationsanlagen	311
12.2.5.1 Stromwandlerauswahl für den Regler	312
12.2.5.2 Festlegung der Stufenzahl und -leistung	313
12.2.5.3 Einstellung des Regleransprechwertes (C/k -Wert)	314
12.2.5.4 Anforderungen an Leistungskondensatoren sowie Anschluss und Absicherung	315
12.2.5.5 Rückwirkungen auf Tonfrequenz-Rundsteueranlagen	319
12.3 Kompensation bei Betrieb nichtlinearer Verbraucher	322
12.3.1 Negative Auswirkungen von Oberschwingungen im Netz	322
12.3.2 Maßnahmen zur Reduzierung von Oberschwingungen	327
12.3.2.1 Einbau verdrosselter Kondensatoren	327
12.3.2.2 Einsatz abgestimmter Filterkreise	331
12.3.2.3 Betrieb mit Aktivfiltern	334
12.4 Planung von Kompensationsanlagen mit Produkten der Fa. Modl	335
12.5 Nachweis des wirtschaftlichen und technischen Nutzens der Blindleistungskompensation	338
13 Auslegung des NS-Netzschutzes	344
13.1 Schutz- und gerätetechnische Grundlagen	344
13.1.1 Sicherungen	345
13.1.2 Leistungsschalter	346
13.1.3 Schaltkombinationen	350
13.1.4 Vergleichende Bewertung der Eigenschaften von Schutzeinrichtungen	353
13.2 Selektivität in NS-Netzen	355
13.2.1 Radial betriebene Netze	355
13.2.1.1 Selektivität zwischen NH-Sicherungen	356
13.2.1.2 Selektivität zwischen Leistungsschaltern	357
13.2.1.3 Selektivität zwischen Leistungsschalter und NH-Sicherung	361
13.2.1.4 Selektivität bei parallelen Einspeisungen	364
13.2.1.5 Selektivität und Unterspannungsschutz	370
13.2.2 Geschlossen betriebene NS-Netze	371
13.2.2.1 Selektivität in Maschennetzen mit Knotenpunktsicherungen	371
13.2.2.2 Selektivität bei Betrieb von Strahlennetzen im Netzverband	372
13.2.2.3 Selektivität in Mehrfachstrahlennetzen mit Schienenverteilern	374
13.3 Beispiel einer selektiven Schutzkoordination mit SIMARIS® design	374
14 Verzeichnis der verwendeten Akronyme, Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes	381
14.1 Akronyme und Abkürzungen	381
14.2 Formelzeichen	384

14.2.1 Ströme	384
14.2.2 Spannungen	384
14.2.3 Widerstände	385
14.2.4 Leistungen und Energie	385
14.2.5 Zeit/Dauer	385
14.2.6 Faktoren	385
14.2.7 Sonstige Größen	386
14.3 Indizes	387
Literaturverzeichnis und weiterführendes Schrifttum	388
Stichwortverzeichnis	411

A Grundlagen

1 Einführung

1.1 Besonderheiten von Industrienetzen

Elektrische Netze dienen der leitungsgebundenen Übertragung und Verteilung von Elektroenergie. Die Energieübertragung und -verteilung erfolgt dabei immer über mehrere Spannungsebenen. Von der Hoch- über die Mittel- bis zur Niederspannung bestehen Netze deshalb aus Zweigen (Transformatoren, Leitungen) und Knoten (Schaltanlagen mit integrierter Schutz- und Leittechnik). Ihrer Versorgungsaufgabe und Bestimmung entsprechend unterscheidet man öffentliche und industrielle Verteilungsnetze. Gegenüber öffentlichen Verteilungsnetzen weisen industrielle Verteilungsnetze besondere Merkmale und Eigenschaften auf. Markante Besonderheiten von Industrienetzen sind:

- *Hohe Last- und Schaltanlagendichte*

Für die Energieverteilung in Industriebetrieben sind die Abstände zwischen den Netzknoten auf allen Spannungsebenen relativ kurz. Deshalb ist das Verhältnis der Zahl von Schaltanlagen zur Gesamtleitungslänge in Industrienetzen größer als in öffentlichen Netzen [1.1]. Außerdem zeichnen sich Industrienetze durch sehr große spezifische Flächenlasten aus. Die spezifische Flächenlast in Betrieben der metallverarbeitenden Industrie z. B. liegt in Abhängigkeit von der Verbraucherstruktur zwischen 70 und 600 VA/m². In mechanischen Werkstätten kann man im Mittel Werte zwischen 150 bis 300 VA/m² erwarten. Bei diesen Flächenlasten sind die Anteile für die Beleuchtung (ca. 20 bis 30 VA/m²) und die Belüftung (ca. 15 bis 20 VA/m²) enthalten [1.2, 1.3].

Dagegen weisen öffentliche Verteilungsnetze in der Regel nur eine spezifische Flächenlast zwischen 2 und 20 VA/m² auf.

Wegen des deutlichen Unterschieds in der Last- und Schaltanlagendichte sind die bevorzugten Netzstrukturen der öffentlichen Stromversorgung für die industrielle Stromversorgung normalerweise nicht geeignet [1.4].

- *Hohe Kurzschlussleistung*

Die Sicherstellung des Anlaufs bzw. Wiederhochlaufs großer Motoren oder Motorgruppen erfordert eine hohe Kurzschlussleistung. Industrienetze müssen deshalb über eine ausreichend kleine Netzimpedanz verfügen. Mit einer kleinen Netzimpedanz ist aber auch ein hohes Niveau der Kurzschlussströme und eine entsprechend hohe dynamische und thermische Beanspruchung der Betriebsmittel verbunden. Der Worst Case dieser Kurzschlussstrombeanspruchung ist immer unter Berücksichtigung der im Fehlerfall rückspeisenden Asynchronmotoren zu berechnen. Wegen der vergleichsweise hohen Kurzschlussstrombeanspruchung muss in Industrienetzen ganz besonderer Wert auf eine schnelle Schutzlösung gelegt werden [1.5]. Dies bedingt den bevorzugten Einsatz von HH-Sicherungen und Differentialschutzeinrichtungen.

- *Hohe mechanische und elektrische Beanspruchung der Schaltgeräte*

In Industrienetzen gibt es Einsatzfälle, die besonders hohe Anforderungen an die Schaltgeräte stellen [1.6]. Höheren mechanischen Beanspruchungen sind z. B. Schaltgeräte ausgesetzt, die für die Blindleistungskompensation und den Betrieb von Lichtbogenöfen zum Einsatz kommen. Bei der Blindleistungskompensation müssen Kondensatoren oder Ladestromspulen in der Regel mehrmals am Tag ein- und ausgeschaltet werden. Beim Betrieb von Lichtbogenöfen erhöht sich die Schaltspielzahl sogar auf bis 100 Schaltungen pro Tag. Das Ein- und Ausschalten der Hochstromelektroden von Ofentransformatoren führt aber auch zu extrem hohen elektrischen Beanspruchungen.

Ofentransformatoren sind dynamische Verbraucher, die beim Einschalten hochfrequente Ausgleichvorgänge mit gefährlichen Resonanzerscheinungen verursachen können. Beim Ausschalten wiederum sind durch Stromabriss und multiple Wiederzündungen hohe transiente Überspannungen möglich. Zu hohe transiente Überspannungen führen in der Regel zu einer dielektrischen Überbeanspruchung der Betriebsmittelisolationen.

Um alle in Industrienetzen vorkommenden Schaltaufgaben sicher zu beherrschen, ist deshalb besonderes Augenmerk auf eine durchdachte Schaltgeräteauswahl (z. B. erforderliche Schaltspielzahl, sicheres Schalten großer Kurzschlussströme sowie kleiner induktiver und kapazitiver Ströme) und eventuell notwendige Schutzmaßnahmen gegen unzulässige Überspannungen (z. B. Überspannungsableiter und/oder auf das Netz abgestimmte RC- und CR-Schutzbeschaltungen) zu richten.

- *Reine Kabelnetze mit relativ kurzen Stationsabständen*

Industrienetze sind reine Kabelnetze mit relativ kurzen Stationsabständen. Aufgrund der im Vergleich mit öffentlichen Verteilungsnetzen relativ kurzen Kabelverbindungen zwischen den Stationen sind Schutzkonzepte mit Distanzschutzeinrichtungen meist von untergeordneter Bedeutung. Andererseits können aber auch bei Schutzkonzepten mit Überstromzeitschutzeinrichtungen Selektivitätsprobleme auftreten. Als Ursache für solche Probleme kommen die schaltzustandsabhängige Aufteilung der Fehlerströme sowie die Vorgabe einer kurzen Gesamtausschaltzeit für die selektive Schutzstaffelung in Betracht. Aufgrund möglicher Einschränkungen beim Einsatz von Distanz- und Überstromzeitschutzeinrichtungen werden in den Kabelnetzen der Industrie Differentialschutzeinrichtungen als Hauptschutz bevorzugt.

- *Hohe Anforderungen an die Versorgungszuverlässigkeit des NS-Netzes*

Die Anforderungen an die Versorgungszuverlässigkeit von industriellen NS-Netzen sind wesentlich höher als an die von öffentlichen NS-Netzen. In öffentlichen NS-Netzen (Ortsnetzen) steht die Erfüllung der Versorgungsaufgabe im Normalbetrieb im Vordergrund. Das $(n-1)$ -Prinzip kommt nicht oder nur sehr eingeschränkt zur Anwendung [1.7]. In industriellen NS-Netzen dagegen ist die Anwendung des $(n-1)$ -Prinzips eine *conditio sine qua non* für die sichere Versorgung der ablaufenden Fertigungsprozesse.

- *Gravierende Netzrückwirkungen durch dynamische Verbraucher*

In Industrienetzen gibt es eine Vielzahl von Verbrauchern, die Blindleistung erzeugen oder die Sinusform des Stromes verändern [1.8]. Der Betrieb großer Asynchronmotoren, Widerstandsschweißanlagen und stromrichtergespeister Antriebe kann gravierende Netzrückwirkungen wie Spannungsschwankungen, Spannungseinbrüche, Spannungsunsymmetrien und harmonische Spannungsverzerrungen verursachen. Bei periodisch auftretenden Stoßbelastungen werden außerdem Flicker erzeugt. Alle Netzrückwirkungen sind so zu begrenzen, dass die Auswirkungen auf den verursachenden und die anderen Verbraucher sowie auf einzelne Betriebsmittel

im Rahmen zulässiger Werte bleiben. Deshalb muss die anforderungsgerechte Gestaltung und Bemessung von Industrienetzen auch Maßnahmen einschließen, die unzulässige Netzzrückwirkungen verhindern. Solche Abhilfemaßnahmen sind z. B. Anlassverfahren für große Hochspannungsmotoren, aktive Filterkreise und Sperrdrosseln, geregelte Blindleistungskompensationsanlagen sowie dynamische DVR (Dynamic Voltage Restorer)-Kompensationseinrichtungen.

- *Existenz von Eigenerzeugungsanlagen*

Für den Fall, dass in Industriebetrieben auch Eigenerzeugungsanlagen existieren, sind netztechnische Randbedingungen für den stabilen Parallelbetrieb des industriellen Eigenstrom- mit dem öffentlichen Fremdnetz zu definieren [1.4]. Bei drohender Instabilität durch kurzschlussartige Fehler im Fremdnetz oder unzulässiger Energieflussumkehr muss das industrielle Eigenstromnetz in einen stabilen Inselbetrieb überführt werden. Die Überführung in den Inselbetrieb erfolgt mit Hilfe von Netzentkupplungseinrichtungen. Als Entkupplungskriterien dienen Frequenzrückgang, Spannungseinbruch sowie Leistungs- und Stromrichtung [1.5].

Um einen stabilen Inselbetrieb sicherzustellen, ist oftmals ein zusätzliches automatisches Lastabwurfssystem erforderlich. Im Fall sinkender Frequenz wird Last abgeworfen, um den für die ablaufenden Hauptprozesse benötigten Energiebedarf an die allein verbliebene Eigenerzeugung anzupassen. Nach der Fehlerbeseitigung im öffentlichen Fremdnetz und automatischer Synchronisierung des Eigenstromnetzes werden beide Netze wieder parallel geschaltet.

- *Hohe Benutzungsstundenzahl der elektrischen Betriebsmittel und Anlagen*

Die optimale Auslastung kapitalintensiver Produktionsanlagen und der Zwang zur Wirtschaftlichkeit in der Produktion führen zu hohen Benutzungsstundenzahlen der elektrischen Betriebsmittel und Anlagen. In einzelnen Industriezweigen werden Benutzungsdauern von bis zu 8.000 h/a erreicht [1.9]. Aufgrund der hohen jährlichen Benutzungsstundenzahlen ist eine besonders energieeffiziente und verlustarme Stromversorgung anzustreben.

- *Enge Verknüpfung von Energieübertragung, -verteilung und Prozessführung*

In der Industrie sind die beiden Hauptfunktionen eines elektrischen Netzes, Übertragung und Verteilung von Energie, eng mit dem jeweiligen Produktionsprozess verknüpft. Für die prozessnahe Funktionsverknüpfung ist eine durchgängige Informationsfluss zwischen Schutz-, Leit- und Automatisierungssystemen erforderlich. Dieser Forderung werden oftmals nur multifunktionale Industrieleitsysteme für Energieverteilung und Prozessführung gerecht.

Die erläuterten Besonderheiten machen die wesentlichen Unterschiede zwischen öffentlichen und industriellen Verteilungsnetzen deutlich. Für die Gestaltung und Bemessung von Industrienetzen ergeben sich somit auch unterschiedliche Planungsempfehlungen.

1.2 Notwendigkeit netz- und anlagentechnischer Gesamtlösungen

Die Netze in der Industrie haben sich zum großen Teil über einen langen Zeitraum entwickelt. Das Resultat solcher Entwicklungen sind oftmals historisch gewachsene Netzkonfigurationen, die nicht alle Anforderungen hinsichtlich

- hoher Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz,
- übersichtlicher Betriebsweise,
- ausreichender Redundanz im Fehlerfall,

- selektiver Schutzauslösung und schneller Fehlerbehebung,
- Personensicherheit entsprechend den Berufsgenossenschaftlichen Vorschriften (z. B. Unfallverhütungsvorschrift BGV A3) bzw. den Technischen Regeln für die Betriebssicherheit (z. B. TRBS 2131),
- Kurzschlussfestigkeit der Betriebsmittel,
- hoher elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV),
- geringer Umweltbeeinträchtigung

gleichsam gut und/oder vorschriftengerecht erfüllen. Hier ist es Sache der Netzplanung, die historisch gewachsenen Strukturen generell in Frage zu stellen und ganzheitliche Lösungen für eine wirtschaftliche und sichere Stromversorgung zu entwickeln.

Die planerische Gelegenheit zur Entwicklung einer netz- und anlagentechnischen Gesamtlösung ergibt sich bei jeder Ausbau- und Ertüchtigungsmaßnahme des Netzes [1.10]. Hierfür kommen folgende Maßnahmen in Betracht:

- Neuverlegung von Kabeln bei produktionsbedingten Netzerweiterungen,
- Anschluss zusätzlicher Netz-Unter- oder Transformator-Schwerpunktstationen für die Versorgung neuer Werkshallen oder Fertigungsbereiche,
- Auswechslung nicht mehr betriebssicherer oder kurzschlussfester Kabel,
- Ersatz von MS-Schaltanlagen und -Geräten mit unzureichendem oder überholtem Sicherheitsstandard,
- Spannungsumstellungen in der Einspeise- und Verteilungsebene.

Auch in der Industrie wird der Druck zur Effizienzsteigerung beim sicheren Betrieb von Verteilungsnetzen eine Abkehr von restriktiv gehandhabten Investitionen in isolierte Einzelmaßnahmen erzwingen. Die erforderliche Effizienzsteigerung und Zukunftssicherheit bieten nur nachhaltige Investitionsentscheide, die auf einer netz- und anlagentechnischen Gesamtlösung beruhen. Nur mit einer solchen Lösung ist eine wirtschaftliche und sichere Stromversorgung mit dauerhaftem Kundennutzen gewährleistet. Außerdem werden steigende Stromkosten, geringere Amortisationszeiten und rechtliche Neuregelungen die Bereitschaft für Investitionen in energieeffiziente Gesamtlösungen befördern [1.11].

1.3 Aufgabe der Netzplanung

Bei der Planung der Stromversorgung für Industriebetriebe sind Entscheidungen zur Netzgestaltung, -bemessung und -betriebsweise zu treffen. Diese Entscheidungen müssen sich durch eine hinreichende Versorgungsqualität (= Versorgungszuverlässigkeit + Spannungsqualität) und hohe Effizienz auszeichnen. Während die Versorgungsqualität allein von den spezifischen Anforderungen des jeweiligen Fertigungsprozesses bestimmt wird, hängt die Effizienz vor allem von den nutzbaren Kostensenkungspotentialen ab. Aufgabe der Netzplanung muss es sein, den Zielkonflikt zwischen der Nutzung von Kostensenkungspotentialen und hoher Versorgungsqualität zu lösen [1.12]. Der Lösung dieses Zielkonflikts dienen folgende Planungsinhalte:

- Festlegung neuer und Verbesserung alter Netzstrukturen,
- Auswahl von Schaltanlagenkonfigurationen und Anlagegrundsaltungen,
- Standortbestimmung für Netzeinspeisungen und Trassenwahl für Kabel und Leitungen,
- Bemessung der Betriebsmittel nach Betriebsstrom- und Fehlerstrombelastbarkeit,
- Art der Sternpunktbehandlung bei galvanisch getrennten Netzen,

- prozessabhängige Anwendung des $(n-1)$ -Ausfallkriteriums,
- Festlegung von Anlassverfahren für große Hochspannungsmotoren,
- Vorgabe von Lösungen für die Überführung von Industrienetzen mit Eigen-erzeugung und Fremdbezug in einen stabilen Inselbetrieb,
- Festlegung von Maßnahmen zur Flickerkompensation und Kompensation dynamischer Spannungseinbrüche,
- Festlegung von Maßnahmen zur Begrenzung von Netzurückwirkungen, die durch Oberschwingungen verursacht werden,
- Aufstellung von Blindleistungsbilanzen und Ableitung entsprechender Kompensationsmaßnahmen,
- Ausarbeitung selektiver und sicherer Netzschutz- und Maschinenschutzkonzepte,
- Auswahl elektrischer Betriebsmittel nach Umweltbedingungen (z. B. Klima, Verschmutzungsgrad, Brandlast, Explosionsschutz).

Diese Planungsinhalte machen deutlich, dass die Industrienetzplanung äußerst vielschichtig und anspruchsvoll ist. Aufgrund ihrer Vielschichtigkeit und ihren komplexen Auswirkungen auf die Versorgungsqualität und Effizienz sind Planungsentscheidungen besonders verantwortungsvoll zu treffen. Außerdem lassen sich die in der Planungsphase getroffenen Entscheidungen zur Netzgestaltung, -bemessung und -betriebsweise in den nachfolgenden Phasen von Projektierung und Projektabwicklung nur bedingt korrigieren.

Die wesentlichen Verflechtungen der Netzplanung mit den Phasen des Erneuerungsprozesses in Industriebetrieben zeigt Bild A1.1. Das Bild veranschaulicht, wie Netzplanung und Netzbetrieb durch zu treffende Entscheidungen über notwendige Folgeinvestitionen interaktiv miteinander verknüpft sind. Der Netzbetrieb nach der Inbetriebsetzung (IBS) ist gekennzeichnet durch

- Bedienungs- und Überwachungsmaßnahmen sowie
- Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen.

Die Maßnahmen für den Netzbetrieb unterliegen äußeren Beeinflussungen. Markante Einflussgrößen während des langjährigen Betriebes von Industrienetzen sind:

- zum Teil sprunghafter Lastanstieg durch Erweiterung der Produktion,
- Anstieg der wirksamen Kurzschlussleistung durch den Wechsel zu Transformatoren mit größerer Bemessungs-Leistung oder kleinerer relativer Kurzschlussleistung im vorgeordneten Netz,
- Alterung und natürlicher Verschleiß der Betriebsmittel,
- Schädigung von Betriebsmitteln im Fehlerfall und
- Änderung der Verbraucherstruktur durch den wachsenden Anteil von EMV-empfindlichen Verbrauchern (z. B. informationstechnische Anlagen und Computersysteme) und Oberschwingungserzeugern (z. B. Austausch konventioneller Glüh- und Leuchtstofflampen gegen Energiesparlampen, Modernisierung der Antriebe von Umformer- auf Stromrichtertechnik, bevorzugter Einsatz drehzahl geregelter Antriebe mit Leistungselektronik).

Außerdem können die Anforderungen an die Sicherheit des Netzbetriebs durch sich ändernde Vorschriften und Normen beeinflusst werden. Normen sind anerkannte Regeln der Technik, die ständig an den aktuellen Wissensstand angepasst werden. Auch diese normative Anpassung von Vorschriften an den aktuellen Stand der Technik kann eine neue Netzplanung empfehlenswert machen.

Grundsätzlich zu empfehlen ist eine neue Netzplanung, wenn die vorhandene Struktur des Verteilungsnetzes schon vor der Investitionsentscheidung für eine neue Netzer-

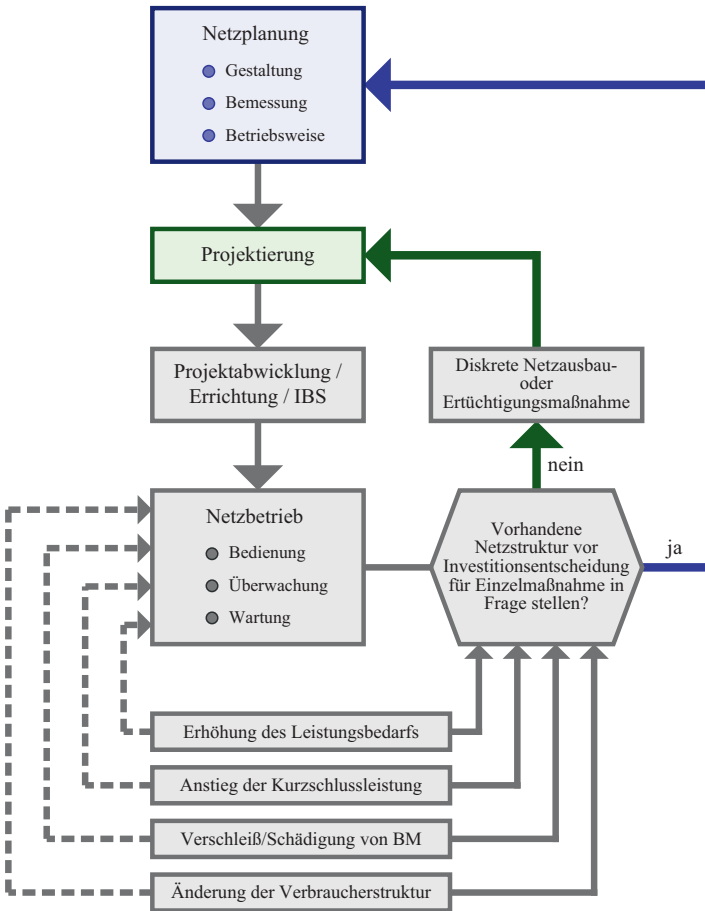


Bild A1.1 Phasen des Erneuerungsprozesses in Industriebetrieben

weiterung in Frage gestellt werden muss (siehe Bild A1.1). Zur Aufgabe der Netzplanung gehört es dann, effiziente und den veränderten Anforderungen entsprechende Festlegungen zur Gestaltung, Bemessung und Betriebsweise zu erarbeiten. Die planerischen Festlegungen zur Gestaltung und Bemessung betreffen hier vor allem die Rückführung des Netzes auf klare Strukturen sowie die Schaffung von technisch und wirtschaftlich sinnvollen Reserven hinsichtlich Betriebsstrom- und Fehlerstrombelastbarkeit der Betriebsmittel. In ihrer Gesamtheit bietet die Industrienetzplanung die Gewähr dafür, dass die heutigen produktions- und verfahrenstechnischen Prozesse energieeffizient, zuverlässig und in höchster Qualität geführt werden können.

2 Grundsätzlicher Ablauf einer Planungsaufgabe

2.1 Top-down-Prinzip

Die Entwicklung von Netz- und Anlagenkonzepten für die industrielle Stromversorgung verlangt ein systematisches und strategisches Vorgehen. Kennzeichnend für dieses Vorgehen ist die ganzheitliche Betrachtung aller Spannungsebenen (110 kV, MS, NS), die für die Versorgung des betreffenden Fertigungsprozesses signifikant sind.

Für das systematische Vorgehen bei der Netzplanung eignet sich besonders das Top-down-Prinzip, weil langfristig bindende Entscheidungen mit großer Weitsicht und Erfahrung getroffen werden müssen [2.1, 2.2]. Den auf dem Top-down-Prinzip beruhenden Ablauf der Grundsatzplanung für Industrienetze zeigt Bild A2.1.

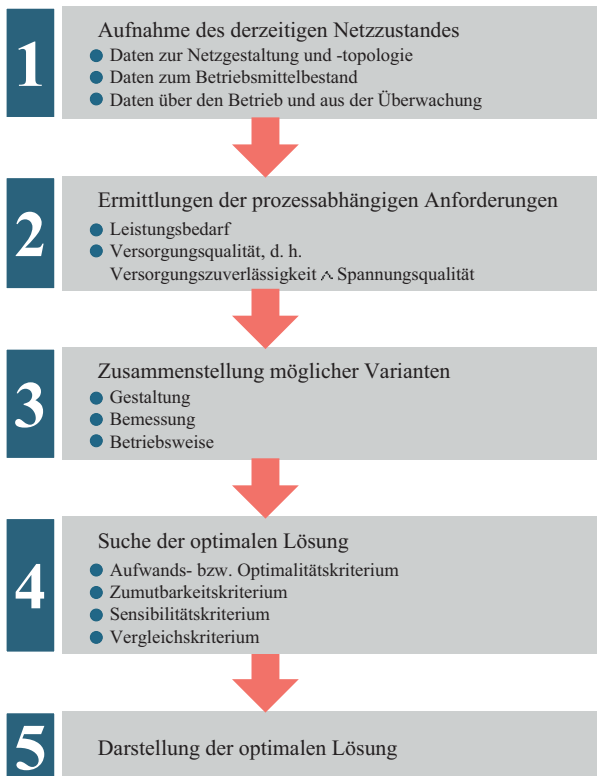


Bild A2.1
Grundsätzlicher Ablauf einer Planungsaufgabe für langfristig bindende Entscheidungen

2.2 Ermittlung des bestehenden Netzzustandes

Der bestehende Netzzustand ist der Basiszustand für die Rückführung historisch gewachsener Industrienetzstrukturen auf einfache und klare Strukturen, die alle prozessabhängigen Anforderungen hinsichtlich Leistungsbedarf und Versorgungsqualität wirtschaftlich erfüllen.

Um den bestehenden Netzzustand zu ermitteln, sind folgende Daten aufzunehmen:

a) *Daten zur Netzgestaltung und -topologie*

Hierzu zählen Daten, die in schematischen und topologischen Netzplänen, Bebauungsplänen sowie Maschinenaufstellungsplänen enthalten sind. Im Einzelnen sind das Angaben über

- die örtliche Lage der Einspeisung aus dem übergeordneten Netz,
- die Standorte von Stationen zur Energieverteilung,
- die Trassenführung von MS- und NS-Kabeln,
- die Bebauung innerhalb des Werksgeländes,
- die werksinternen Fertigungs- und Produktionsflächen mit örtlichen Lastschwerpunkten sowie
- die generelle Struktur und den Aufbau des Industrienetzes.

b) *Daten zum Betriebsmittelbestand*

Zu diesen Daten gehören netz- und anlagentechnische Angaben über die Einspeisung und die im Netz vorhandenen Betriebsmittel. Eine Übersicht der aufzunehmenden Betriebsmitteldaten zur Ermittlung des Basiszustandes für die Industriemnetzplanung enthält Tabelle A2.2.

c) *Daten über den Betrieb und aus der Überwachung*

Über den Betrieb und aus der Überwachung benötigt der Netzplaner folgende Informationen:

- Art der Sternpunktbehandlung des MS-Netzes (isolierter Sternpunkt (OSPE), Resonanzsternpunkterdung (RESPE), niederohmige Sternpunkterdung (NOSPE) oder starre Sternpunkterdung),
- Systemart des NS-Netzes (EMV-gerechtes TN-System mit zentral geerdetem PEN-Leiter, TN-S-System, TN-C-System, TN-C-S-System, TT-System oder IT-System),
- Normalschaltzustand und relevante Havarieschaltzustände,
- Organisation der Betriebsführung (z. B. vom Fehlereintritt bis zur Fehlerbeseitigung),
- Belastungsmesswerte von 110-kV/MS-Transformatoren, MS/NS-Transformatoren und MS-Kabelverbindungen,
- Spannungsmesswerte an ausgewählten MS- und NS-Knotenpunkten (Effektivwerte der Betriebsspannung, Werte über die Höhe, Dauer und Häufigkeit von Spannungseinbrüchen),
- Angaben über die Verbraucherstruktur (Existenz großer Asynchronmotoren, stromrichter gespeister Antriebe, Widerstandsschweißanlagen, Lichtbogenöfen, Großprüffelder, usw.),
- Angaben aus der Lebenslaufakte einzelner Betriebsmittel (Inbetriebnahme und Instandhaltungszeitpunkte, Diagnoseergebnisse sowie Störungen),
- Angaben über die schutz- und automatisierungstechnische Ausrüstung (Umschaltautomatiken, USV-Anlagen, Schutzrelais und deren Einstellungen, Steuerungseinrichtungen, Einrichtungen zur Meldung von Störungen, usw.).

Die Bereitstellung der erforderlichen Informationen zur Ermittlung des vorhandenen Netzzustandes wird im zunehmenden Maße durch Systeme der Informations- und Datenverarbeitung (IT-Systeme) unterstützt [2.3, 2.4].

Tabelle A2.2 Erforderliche Betriebsmitteldaten des Basiszustandes (Netzdaten)

Übergeordnetes Netz														
VNB	Nennbetriebsspannung U_{nN} [kV]		Netzkurzschlussleistung				R / X - Verhältnis [1]	Stoßfaktor κ [1]	Netzzeitkonstante τ [1]					
			Maximaler Wert S''_{k-max} [MVA]		Minimaler Wert S''_{k-min} [MVA]									
110-kV/MS-Transformator(en)														
Transformatorname	Bemessungs-Spannung		Bemessungs-Leistung S_{rT} [MVA]	Kurzschluss-Spannung		Kurzschluss-verluste P_k [kW]	Leerlauf-verluste P_0 [kW]	Leerlauf-strom i_0 [%]	Schalt-gruppe	Zusatz-spannung pro Regel-stufe u_k [%]	Regelstellung		Kurzschluss-spannung bei	
	primär U_{rT1} [kV]	sekundär U_{rT2} [kV]		komplex u_{rZ} [%]	ohmsch u_{rR} [%]						kleinste Stufe s_{min} [1]	größte Stufe s_{max} [1]	kleinster Regel-stufe u_{uZ} [%]	größter Regel-stufe u_{oZ} [%]
MS-Schaltanlagen (Kurzschlussfestigkeits- und MS/NS-Transformatordaten)														
Stations- bzw. Knoten-punktname	Kurzschlussfestigkeitsparameter						Parameter der angeschlossenen Transformatoren							
	Bemessungs-Spannung U_m [kV]	Bemessungs-Kurzschluss-ausschalt-strom I_{sc} [kA]	Bemessungs-Kurzschluss-ein-schalt-strom I_{ma} [kA]	Bemessungs-Kurzzeit-strom I_{thr} [kA]	Bemessungs-Kurzzeit t_{thr} [s]	Zahl typen-gleicher Trans-formatoren n [1]	Bemessungs-Spannung		Bemessungs-Leistung S_{rT} [MVA]	Bemessungs-Kurzschluss-spannung		Kurz-schluss-verluste P_k [kW]	Leerlauf-verluste P_0 [kW]	Schalt-gruppe
							primär U_{rT1} [kV]	sekundär U_{rT2} [kV]		komplex u_{rZ} [%]	ohmsch u_{rR} [%]			
MS(NS)-Schaltanlagen (Belastungs- und Motordaten)														
Stations- bzw. Knoten-punktname	Belastungsdaten				Daten der angeschlossenen Motoren									
	Maximaler Leistungsbedarf P_{max} [MW]	Leistungsfaktor \cos [1]	Maximale zeitgleiche Motor-leistung $g \sum P_{rM}$ [MW]	Zahl typen-gleicher Motoren n [1]	Bemessungs-Spannung U_{rM} [kV]	Bemessungs-Leistung P_{rM} [kW]	Bemessungs-Strom I_{rM} [A]	Wirkungs-grad η_{rM} [%]	Leistungsfaktor $\cos rM$ [1]	Verhältnis von Anlauf-zu Bemessungs-Strom I_{start}/I_{rM} [1]	Synchrone Drehzahl n_{syn} [min ⁻¹]	Polpaar-zahl pM [1]		
MS(NS)-Kabel														
Name der Kabel-verbinding	Typ	Bemessungs-Spannung U_m [kV]	Strom-belast-barkeit I_r [A]	Wirkwiderstands-belag im Mitsystem bei		Blindwiderstandsbelag im Mitsystem X'_1 [Ω/km]	Wirkwiderstandsbelag im Nullsystem R'_0 [Ω/km]	Blindwiderstandsbelag im Nullsystem X'_0 [Ω/km]	Spezifischer Erd-schluss-strom I'_{CE} [A/km]	Bemessungs-Kurzzeitstrom		Bemessungs-Kurzzeit t_{thr} [s]		
				20 °C R'_{1-20} [Ω/km]	90 °C R'_{1-90} [Ω/km]					Leiter I_{thr1} [kA]	Schirm I_{thr2} [kA]			
Kurzschlussstrombegrenzungs-drosseln														
Name der Kurzschlussstrom-begrenzungs-drossel	Bemessungs-Spannung U_{rD} [kV]	Bemessungs-Strom I_{rD} [A]	Bemessungs-Spannungsfall u_{rD} [%]	Reaktanz X_D [Ω]	Bemessungs-Kurzzeitstrom I_{thr} [kA]	Bemessungs-Kurzzeit t_{thr} [s]								
Generatoren														
Generatorname	Bemessungs-Spannung U_{rG} [kV]	Bemessungs-Leistung P_{rG} [MW]	Nennleistungsfaktor $\cos rG$ [1]	Subtransiente Reaktanz x'_d [%]	R/X-Verhältnis am Anschlussort [1]									

2.3 Ermittlung der Anforderungen

Industrielle Verteilungsnetze sind so zu planen, dass sie alle prozessabhängigen Anforderungen hinsichtlich

- Leistungsbedarf und
- Versorgungsqualität

wirtschaftlich erfüllen und der zu versorgende Fertigungsprozess energieeffizient, zuverlässig und in höchster Qualität ablaufen kann. Auf die Ermittlung dieser prozessabhängigen Anforderungen bei der Planung industrieller Verteilungsnetze wird im Folgenden eingegangen.

2.3.1 Leistungsbedarf

Der Leistungsbedarf ist für jeden Ort in seiner jeweiligen Größe zu ermitteln. Leistungsbedarf bedeutet dabei die prozessabhängige Höchstleistung von einzelnen Verbrauchern und Verbrauchergruppen sowie die insgesamt beanspruchte Höchstleistung des betreffenden Industriebetriebes. Für die von einem beliebigen Industriebetrieb beanspruchte Jahreshöchstleistung gilt:

$$P_{\max} = b \cdot \sum_i P_{\text{an-}i} = g \cdot \sum_i P_{\max-i} \quad (2.1)$$

b Bedarfsfaktor

g Gleichzeitigkeitsfaktor

$P_{\text{an-}i}$ Anschlusswert eines Verbrauchers bzw. einer Verbrauchergruppe i

$P_{\max-i}$ maximaler Wirkleistungsverbrauch eines Verbrauchers oder einer Verbrauchergruppe i

Orientierungswerte für den Bedarfsfaktor b und den Gleichzeitigkeitsfaktor g sind in Tabelle A2.3 genannt. Der Leistungsbedarf für Fertigungsprozesse, die auf relativ begrenztem Raum (z. B. Werkstatthallen) durchgeführt werden, lässt sich auch mit Hilfe flächenspezifischer Kennziffern ermitteln [2.6]. Unter der Voraussetzung, dass die Verbraucher annähernd gleichmäßig über die Produktionsfläche verteilt sind, berechnet sich der Leistungsbedarf wie folgt:

$$P_{\max} = A \cdot P' \quad (2.2)$$

A Produktions- bzw. Fertigungsfläche in m^2

P' spezifische Flächenlast in W/m^2

Richtwerte für spezifische Flächenlasten sind in Tabelle A2.4 aufgeführt. Je nach Art der Fertigung und Automatisierungsgrad sind die höheren oder niedrigeren Flächenlasten zu verwenden.

Mit Hilfe von Gleichung (2.2) lässt sich auch der Leistungsbedarf moderner Datacenter ermitteln. Der Leistungsbedarfsermittlung ist dabei eine spezifische Flächenlast von $P' = 1.500 \text{ W}/\text{m}^2$ zugrunde zu legen [2.10].

Bei der langfristig orientierten Ermittlung des Leistungsbedarfs muss der Netzplaner auch die Entwicklungsfähigkeit des Produktions- bzw. Fertigungsprozesses berücksichtigen. Ein Indikator dieser Entwicklungsfähigkeit ist das vorhandene Potential für zukünftige Erweiterungen der Produktion (z. B. durch nutzbare Platzreserven zur Produktions- und Produktivitätssteigerung in den Werkhallen oder auf dem noch unbebauten Fabrikgelände). Um die perspektivische Lastzunahme in einem Industriebetrieb

trieb zu berücksichtigen, wird in [2.11] eine Bemessungs-Leistung für die Einspeisung vorgeschlagen, die um 30 % bis 50 % größer als der nach Gl. (2.1) ermittelte Leistungsbedarf ist.

Tabelle A2.3 Bedarfsfaktor b und Gleichzeitigkeitsfaktor g für die Ermittlung des Leistungsbedarfs von Industriebetrieben in verschiedenen Branchen (Richtwerte)

Faktoren zur Leistungsbedarfsermittlung			
Branche	Bedarfsfaktor b		Gleichzeitigkeitsfaktor g nach [2.8]
	nach [2.5]	nach [2.6, 2.7]	
Maschinenbau	0,20 ... 0,25	0,23	0,95 ... 0,99
Autoindustrie	0,25	--	0,95 ... 0,99
Papier- und Zellstoffindustrie	0,50 ... 0,70	0,34 ... 0,45	0,95
Textilindustrie (Spinnereien, Webereien)	0,60 ... 0,75	0,32 ... 0,62	1,00
Gummiindustrie	0,60 ... 0,70	0,45 ... 0,51	0,92
chemische Industrie einschl. Erdölindustrie	0,50 ... 0,70	0,60 ... 0,70	0,95
Zementwerke	0,80 ... 0,90	0,50 ... 0,84	0,97
Nahrungsmittelindustrie	0,70 ... 0,90	--	1,00
Steinkohlegruben	1,0	0,36 ... 0,64	--
Braunkohletagebau	0,7	0,70 ... 0,80	--
Metallurgie	0,50 ... 0,90	0,33	1,00
Holzverarbeitungsbetriebe	--	0,15 ... 0,30	0,98
mechanische Werkstätten	--	0,15 ... 0,30	0,99
Walzwerke	0,50 ... 0,80	--	--
Gießereien	--	0,40 ... 0,50	0,94
Brauereien	--	0,40 ... 0,50	--
Schuhfabriken	--	0,40 ... 0,52	0,99

Tabelle A2.4 Richtwerte für spezifische Flächenlasten P'

Produktionsstätte bzw. Verbraucher	spezifische Flächenlast P' in W/m^2	
	nach [2.6]	nach [2.9]
mechanische Werkstätten	200 ... 400	50 ... 250
Werkzeugbau	50 ... 100	70 ... 100
Stanzereien	150 ... 300	80 ... 120
Presswerke	150 ... 300	300 ... 450
Schweißanlagen	300 ... 600	150 ... 250
Lackier- und Härteanlagen	300 ... 1.000	200 ... 400
Galvanotechnik	600 ... 800	--
Kunstharzpresserei	100 ... 200	--

Die prozessabhängige Ermittlung des Leistungsbedarfs berührt auch die Auswahl und Bemessung der Betriebsmittel sowie die Blindleistungskompensation. Die diesen Planungsinhalten entsprechenden Details (Auswahl der Transformator-Bemessungsleistung nach dem Belastbarkeits- oder Spannungsstabilitätskriterium, Festlegung der erforderlichen Kondensatorleistung mit Hilfe des multiplen Koeffizientenverfahrens) werden in den Kapiteln 11 und 12 behandelt.

2.3.2 Versorgungsqualität

Die erforderliche Versorgungsqualität ergibt sich aus den Anforderungen, die der jeweilige Fertigungsprozess an die Versorgungszuverlässigkeit und Spannungsqualität der Stromversorgung stellt. Deshalb ist die Versorgungsqualität eine UND-Verknüpfung von Versorgungszuverlässigkeit und Spannungsqualität.

Für die Ermittlung und Bewertung der Versorgungsqualität gilt:

$$VQ = VZ \wedge SQ \quad (2.3)$$

VQ Versorgungsqualität
VZ Versorgungszuverlässigkeit
SQ Spannungsqualität

Nur wenn die Bedingung für diese Konjunktion erfüllt ist (VQ ist prozessgerecht, wenn VZ und SQ prozessgerecht sind), können Fertigungsprozesse zuverlässig und in höchster Qualität geführt werden.

2.3.2.1 Versorgungszuverlässigkeit

Die Versorgungszuverlässigkeit (VZ) ist unabdingbarer Bestandteil der Versorgungsqualität (VQ). Ihre bestimmenden Größen sind die Häufigkeit und Dauer von Versorgungsunterbrechungen. Für eine geringe Häufigkeit von Versorgungsunterbrechungen sind vor allem hohe Qualitätssicherungsstandards bei der Fertigung und Montage der elektrischen Betriebsmittel maßgebend. Außerdem tragen die korrekte Auswahl und Bemessung aller Betriebsmittel zu einer indirekten Reduzierung zukünftiger Versorgungsunterbrechungen bei.

Besonders signifikant für die praxisnahe Netzplanung sind die technisch planbare Dauer von Versorgungsunterbrechungen und die maximale Unterbrechungsdauer, bei der ein Fertigungsprozess noch schadens- und verlustkostenfrei fortgesetzt werden kann. Ausschlaggebend für diese Unterbrechungsdauern sind Ausfallereignisse, die mit einer plausiblen Mindestwahrscheinlichkeit in den verschiedenen Netzebenen (110 kV, MS, NS) auftreten können. Der Einfluss eines Ausfallereignisses auf die schadens- und ausfallkostenfreie Fortführung des Fertigungsprozesses lässt sich in 2 Schritten analysieren:

- *Schritt 1*

Enumeration von Ausfallereignissen, d. h. Vorgabe von Ausfallereignissen oberhalb einer plausiblen Mindestwahrscheinlichkeit [2.12]. Ausfallereignisse mit einer plausiblen Mindestwahrscheinlichkeit sind in klar strukturierten Netzen vor allem unabhängige Einzelausfälle. Der zweifache Störfall und diffizile Ausfallkombinationen können von der Betrachtung in der Regel ausgeschlossen werden. Als sehr unwahrscheinlich gelten auch Ausfälle von MS-Sammelschienen- und NS-Hochstromschienensystemen.

- *Schritt 2*

Untersuchung der Auswirkungen des betreffenden Ausfallereignisses auf die Versorgung des Fertigungsprozesses.

Um eine fundierte VZ-Planungsentscheidung zu treffen, muss Klarheit über die zulässige Unterbrechungsdauer des Fertigungsprozesses und die nach technischen sowie wirtschaftlichen Gesichtspunkten planbare Dauer von Versorgungsunterbrechungen bestehen. In Klassen eingeteilte Unterbrechungsdauern, die für die Planung der Versorgungszuverlässigkeit verwendbar sind, enthält Tabelle A2.5.

Die Unterbrechungsdauern der Tabelle A2.5 gelten für den einfachen Störfall und in Übereinstimmung mit dem $(n-1)$ -Kriterium getroffene Planungsentscheidungen. Bei $(n-1)$ -basierten Planungsentscheidungen darf der nicht unwahrscheinliche Ausfall eines Betriebsmittels zu keiner unzulässigen Versorgungsunterbrechung führen. Diesem Planungsgrundsatz entsprechend wird die Versorgungszuverlässigkeit als technische Restriktion berücksichtigt. Der planerische Königsweg ist jedoch die monetäre Bewertung der Versorgungszuverlässigkeit [2.12]. Die monetäre Bewertung der Versor-

Tabelle A2.5 Klasseneinteilung der Unterbrechungsdauer

Klasse	Maßnahme zur Beendigung bzw. Beherrschung einer Störung	Unterbrechungsdauer T_u
1	Reparatur oder Austausch des beschädigten Betriebsmittels und anschließende manuelle Wiedereinschaltung	$h < T_u \leq d$
2	manuelle Umschaltung vor Ort	$\text{min} < T_u \leq h$
3	Umschaltung mittels Fernsteuerung	$s < T_u \leq \text{min}$
4	einfache automatische (z. B. restspannungsgesteuerte) Umschaltung	$300 \text{ ms} < T_u \leq s$
5	automatische Schnellumschaltung	$30 \text{ ms} \leq T_u < 300 \text{ ms}$
6	Thyristor-basierte, statische Schnellstumschaltung	$T_u \geq \mu\text{s}$
7	schutztechnische Abtrennung der Fehlerstelle	$T_u = 0$ $\text{ms} \leq t_{\Delta u'} < s$
8	schutztechnische Abtrennung der Fehlerstelle und dynamische Kompensation von Spannungseinbrüchen	$T_u = 0$ $t_{\Delta u'} = 0$ $150 \text{ ms} \leq t_{DVR} \leq 600 \text{ ms}$
9	unterbrechungslose Stromversorgung mit statischem oder dynamischem Energiespeicher	$T_u = 0$ $t_{\Delta u'} = 0$ $h \leq t_{USV/DUSV} < d$
<p>$d = \text{Tag(e)}$, $h = \text{Stunde(n)}$, $\text{min} = \text{Minute(n)}$, $s = \text{Sekunde(n)}$, $\text{ms} = \text{Millisekunde(n)}$, $\mu\text{s} = \text{Mikrosekunde(n)}$</p>		
<p>Klasse 1 Stromversorgung des Prozesses ohne Umschalt- und Momentanreserve Klasse 2 bis 6 gesicherte Stromversorgung des Prozesses durch Umschaltreserve („kalte“ Redundanz bei einfachem Störfall) Klasse 7 gesicherte Stromversorgung des Prozesses durch Momentanreserve („heiße“ Redundanz von der Einspeise- bis zur Verteilungsebene) Klasse 8 wie Klasse 7 mit zusätzlichem DVR-System für den Schutz kritischer Lasten vor Spannungseinbrüchen $\Delta u'$ Klasse 9 doppelt gesicherte Stromversorgung des Prozesses durch netzunabhängige Momentanreserve („heiße“ Redundanz bei vollständigem Netzausfall und höchste Spannungsqualität mit Hilfe von statischen Online-USV- oder dynamischen DUSV-Systemen)</p> <p>$t_{\Delta u'}$ Dauer des Spannungseinbruchs $\Delta u'$ im Kurzschlussfall t_{DVR} Kompensationszeit eines DVR $t_{USV/DUSV}$ Überbrückungszeit einer statischen Online-USV bzw. eines DUSV DVR Dynamic Voltage Restorer DUSV Diesel-USV-System USV unterbrechungslose Stromversorgung</p>		

gungszuverlässigkeit beinhaltet die explizite Berücksichtigung der Barwerte von Investitions-, Betriebs- und Ausfallkosten sowie deren aggregierte Minimierung. Ein Modell zur Ermittlung der Ausfallkosten für Industrieunternehmen durch Versorgungsunterbrechungen wird in [2.13] vorgestellt. Die Ergebnisse der Modellrechnung sind in den Bildern A2.6 und A2.7 dargestellt.

Die mit dem Modell [2.13] bestimmten Ausfallkosten erlauben die monetäre Bewertung des Investitionsaufwandes zur Vermeidung unzulässiger Versorgungsunterbrechungen im Vergleich zum Schadensrisiko bei Nichteinhaltung der erforderlichen VZ-

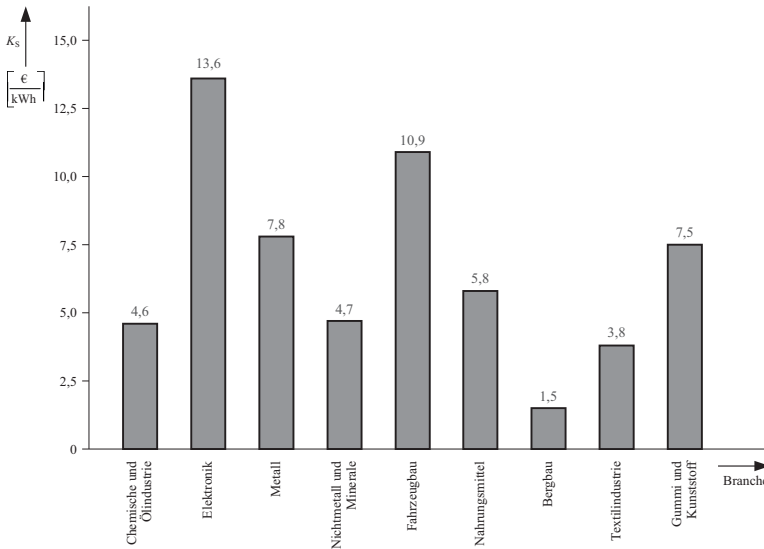


Bild A2.6 Ausfallkosten K_s durch Versorgungsunterbrechungen für deutsche Industriebranchen nach [2.13]

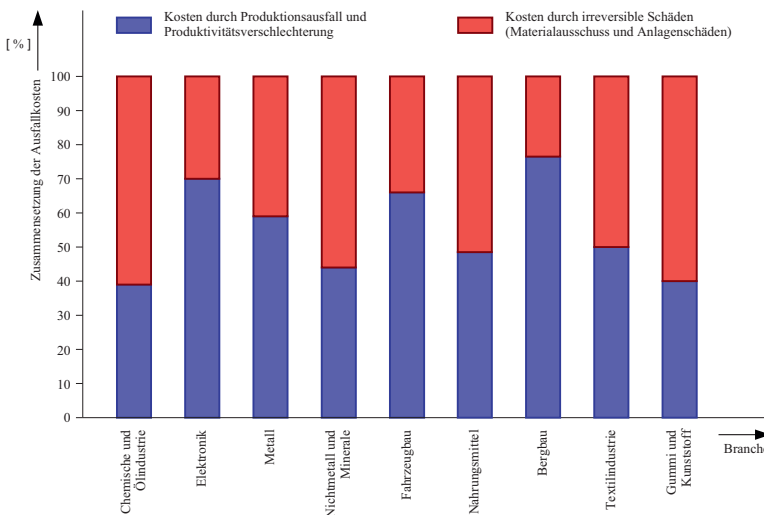


Bild A2.7 Zusammensetzung der Ausfallkosten für Industriebranchen nach [2.13]

Anforderungen. Allerdings sind die in den Bildern A2.6 und A2.7 dargestellten Ausfallkosten reine Orientierungswerte. Unterbrechungsbedingte Schadenskosten unterliegen großen statistischen Streuungen und können in einer konkreten Industriebranche von Unternehmen zu Unternehmen sehr stark variieren. Für genaue und verifizierbare VZ-Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sollten immer die dem Industrieunternehmen durch Versorgungsunterbrechungen tatsächlich entstehenden Schadenskosten Berücksichtigung finden.

Fazit

Für die Versorgungszuverlässigkeit bestehen keine normativen Festlegungen. Gängige Praxis sind deshalb $(n-1)$ -basierte Planungsentscheidungen. Für die Planung der Versorgungszuverlässigkeit nach dem $(n-1)$ -Kriterium können die in Klassen eingeteilten Unterbrechungsdauern der Tabelle A2.5 verwendet werden. Eine nicht restriktive Berücksichtigung der Versorgungszuverlässigkeit ist nur möglich, wenn die unterbrechungsbedingten Schadenskosten bekannt sind.

2.3.2.2 Spannungsqualität

Wie die Versorgungszuverlässigkeit (VZ), so ist auch die Spannungsqualität (SQ) unabdingbarer Bestandteil der Versorgungsqualität (VQ). Im Vergleich zur Vergangenheit hat sich die direkte Abhängigkeit der Versorgungsqualität von der Spannungsqualität aber verstärkt. Der deutlich sichtbare Ausdruck dieser neuen Abhängigkeit sind die gewachsenen Anforderungen, die moderne Industriebetriebe branchenübergreifend an die Spannungsqualität stellen. Vor allem sensible Fertigungsprozesse und die industrielle Anwendung von Hochtechnologien wie

- kontinuierliche Produktionsprozesse in der Plastik- und chemischen Industrie (z. B. Kunststoffspritzgussverfahren),
- mikroprozessorgesteuerte Automatisierungstechnik (Computertechnologie),
- nanotechnologische Verfahren (Nanotechnologie),
- Halbleitertechnik (z. B. Wafer-Fertigung) sowie
- Foto- und Elektronenstrahl-Lithographie (z. B. Fertigung lithographischer Masken für die Belichtung von Wafern)

erfordern speziell auf die konkreten SQ-Anforderungen zugeschnittene Lösungen.

Einerseits stellen die in modernen Industriebetrieben ablaufenden Fertigungsprozesse höchste Anforderungen an die Spannungsqualität, andererseits können aber in solchen Betrieben auch Fertigungsprozesse ablaufen, die wegen ihrer nichtlinearen und fluktuierenden Lasten die Spannungsqualität negativ beeinflussen.

Die negative Beeinflussung der Spannungsqualität durch den Prozess wird mit Hilfe verlaufsorientierter Kenngrößen bewertet. Derartige Qualitätskenngrößen sind Flicker, Oberwellen, Spannungsunsymmetrien und Spannungsschwankungen. Zu den ereignisorientierten Qualitätskenngrößen zählen Spannungseinbrüche, Kurzunterbrechungen der Spannung und Überspannungen. Letztere Kenngrößen werden verwendet, um die negativen Auswirkungen von Fehlern im Netz auf die Spannungsqualität zu beurteilen. Die relevanten Kenngrößen der Spannungsqualität sind in Tabelle A2.8 erläutert und in Bild A2.9 dargestellt.

Um die interne Kompatibilität aller Verbraucher eines Prozesses und die externe Kompatibilität des Prozesses mit dem Versorgungsnetz nachzuweisen, sind exakt definierte Grenzwerte und Verträglichkeitspegel für die Spannungsqualität erforderlich. Die wichtigsten Festlegungen zur Spannungsqualität finden sich in folgenden Normen und Richtlinien:

- DIN EN 50160 (EN 50160): 2008-04 [2.15] (Merkmale der Versorgungsspannung in öffentlichen Netzen),

Tabelle A2.8 Ereignis- und verlaufsorientierte Kenngrößen der Spannungsqualität

Ursachen für die Minderung der Spannungsqualität	Qualitätskenngrößen	
	ereignisorientiert	verlaufsorientiert
Fehler im Netz	Spannungseinbrüche ¹⁾	
	Kurzunterbrechungen der Spannung ²⁾	
	Überspannungen ³⁾	
Netzurückwirkungen		Flicker ⁴⁾
		Oberwellen ⁵⁾
		Spannungsunsymmetrien ⁶⁾
		Spannungsschwankungen ⁷⁾
<p>1) Ursache für Spannungseinbrüche sind nicht allein Kurzschlüsse im Netz. Auch das Ein- bzw. Zuschalten großer Maschinen (Motoren, Transformatoren) und Lasten verursacht Spannungseinbrüche.</p> <p>2) Spannungsunterbrechungen stellen einen Sonderfall der Spannungseinbrüche dar. Symptomatisch sind sie z. B. in 110-kV-Freileitungsnetzen beim Betrieb mit automatischer Wiedereinschaltung (AWE).</p> <p>3) Man unterscheidet äußere und innere Überspannungen. Äußere Überspannungen sind z. B. Blitzüberspannungen. Zu den typischen inneren Überspannungen gehören Schaltüber- und Fehlervorgangsüberspannungen.</p> <p>4) Flicker sind niederfrequente Änderungen der Spannungsamplitude ($f < 25$ Hz). Sie werden durch den intermittierenden Betrieb von Stoßlasten (z. B. Schweißmaschinen) erzeugt. Das menschliche Auge nimmt Flicker in Form von Leuchtdichteschwankungen, die als äußerst störend empfunden werden, wahr. Flicker können auch den so genannten Stroboskopischen Effekt, der verlangsamt Drehzahlen oder den Stillstand rotierender Maschinen vortäuscht, hervorrufen.</p> <p>5) Oberwellen bzw. -schwingungen sind Ströme oder Spannungen, deren Frequenzen ein ganzzahliges Vielfaches der sinusförmigen 50(60)-Hz-Grundschwingung sind. Sie entstehen durch nichtlineare Lasten (z. B. Stromrichteranlagen, Geräte mit elektronischen Netzteilen, Energiesparlampen usw.).</p> <p>6) Spannungsunsymmetrie ist ein Zustand im Drehstromnetz, bei dem die Effektivwerte der drei Spannungen oder die Winkel zwischen zwei aufeinanderfolgenden Phasen nicht gleich groß sind. Spannungsunsymmetrien können kurzzeitig (z. B. unsymmetrischer Fehler) oder zeitweilig (Belastungsunsymmetrie) auftreten.</p> <p>7) Spannungsschwankungen sind eine Aufeinanderfolge von Spannungsänderungen, die durch den Betrieb großer fluktuierender Lasten (z. B. Lichtbogenöfen) hervorgerufen werden.</p>		

- DIN EN 61000-2-2 (VDE 0839-2-2): 2003-02 [2.16] bzw. IEC 61000-2-2: 2002-03 [2.17] (Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgebundene Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen),
- DIN EN 61000-2-4 (VDE 0839-2-4): 2003-05 [2.18] bzw. IEC 61000-2-4: 2002-06 [2.19] (Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen in Industrieanlagen),
- D-A-CH-CZ-Richtlinie 2007 [2.20] (Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen).

Die Norm DIN EN 50160 (EN 50160): 2008-04 [2.15] legt die Qualitätsmerkmale der Spannung für die Lieferung von Elektroenergie aus dem öffentlichen Netz fest (Tabelle A2.10).

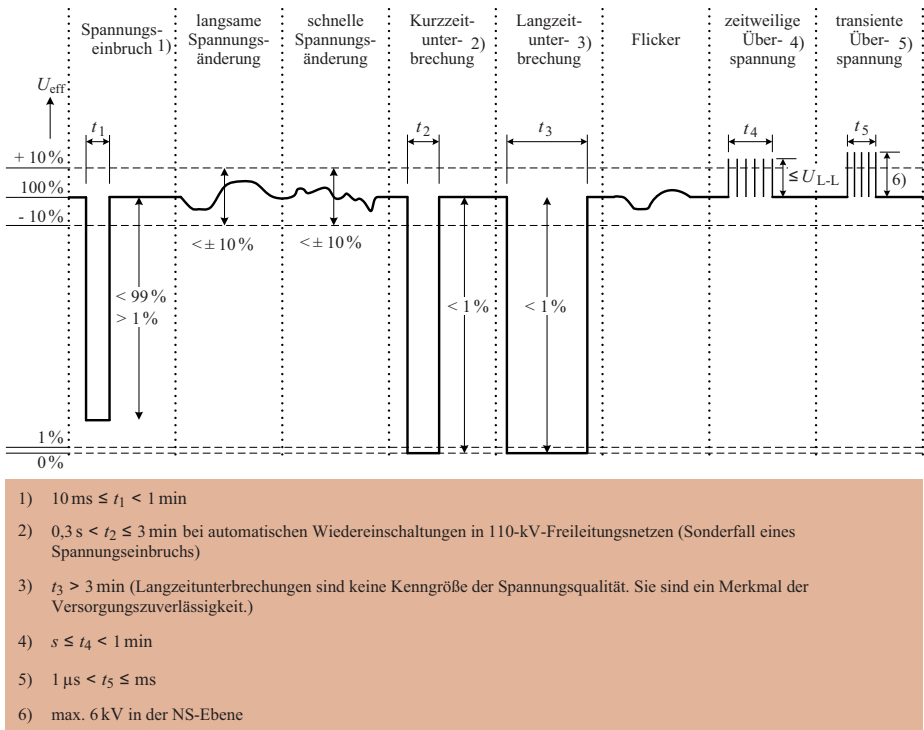


Bild A2.9 Grafische Darstellung von Kenngrößen der Spannungsqualität [2.14]

Dagegen definieren die Normen DIN EN 61000-2-2 (VDE 0839-2-2): 2003-02 [2.16] / IEC 61000-2-2: 2003-03 [2.17] und DIN EN 61000-2-4 (VDE 0839-2-4): 2003-05 [2.18] / IEC 61000-2-4: 2002-06 [2.19] sowie die D-A-CH-CZ-Richtlinie [2.20] die einzuhaltenden SQ-Anforderungen beim Verbrauch von Elektroenergie. Der wesentliche Unterschied zwischen den vorgenannten SQ-Normen ist die zeitliche Einhaltung der Grenzwerte bzw. zulässigen Verträglichkeitspegel. Die Norm DIN EN 50160 (EN 50160): 2008-04 [2.15] gibt eine Vielzahl von Grenzwerten an, die nur zu 95 % jedes Wochenintervalles gelten (siehe Tabelle A2.10). Die normativ auf 95 % beschränkte Gültigkeitsdauer bedeutet aber, dass über insgesamt 5 % eines Wochenintervalls, d. h. 8,4 h, die festgelegten Grenzwerte über- oder unterschritten sein können.

Eine solche Einschränkung der Spannungsqualität lassen die Normen DIN EN 61000-2-2 (VDE 0839-2-2): 2003-02 [2.16] / IEC 61000-2-2: 2002-03 [2.17] und DIN EN 61000-2-4 (VDE 0839-2-4): 2003-05 [2.18] / IEC 61000-2-4: 2002-06 [2.19] nicht zu. Für die differenzierte Bewertung der Spannungsqualität beim Verbrauch von Elektroenergie werden in DIN EN 61000-2-4 (VDE 0839-2-4): 2003-05 [2.18] / IEC 61000-2-4: 2002-06 [2.19] außerdem Umgebungsklassen eingeführt. Im Hinblick auf die Einhaltung der prozessabhängigen SQ-Anforderungen haben diese Umgebungsklassen die Bedeutung von Versorgungs- bzw. Netzklassen.

Insgesamt unterscheidet man 3 Versorgungs- bzw. Netzklassen, die in Tabelle A2.11 beschrieben sind. Um eine fundierte Planungsentscheidung zu treffen, muss der jeweils zu versorgende Prozess einer der 3 Netzklassen zugeordnet werden. Aus der korrekten Zuordnung des Prozesses zu einer bestimmten Klasse leiten sich die Grenzwerte und Verträglichkeitspegel ab, die für die Einhaltung der an die Spannungsqualität gestellten Anforderungen maßgebend sind. Eine Auswahl der wichtigsten Grenzwerte