



Ismail Kasikci

Elektrotechnik für Architekten, Bauingenieure und Gebäudetechniker

Grundlagen und Anwendung
in der Gebäudeplanung

2. Auflage

EBOOK INSIDE

 **Springer** Vieweg

Elektrotechnik für Architekten, Bauingenieure und Gebäudetechniker

Ismail Kasikci

Elektrotechnik für Architekten, Bauingenieure und Gebäudetechniker

Grundlagen und Anwendung
in der Gebäudeplanung

2., aktualisierte Auflage

Ismail Kasikci
Weinheim, Deutschland

ISBN 978-3-658-23762-2 ISBN 978-3-658-23763-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-23763-9>

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2013, 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Lektorat: Karina Danulat

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort zur zweiten Auflage

In vielen Studiengängen ist heute ein elektrotechnisches Grundwissen unbedingt erforderlich. Dieses Lehrbuch vermittelt die Grundlagen der Elektrotechnik für Studierende nichtelektrotechnischer Fachgebiete wie Architektur, Bauingenieurwesen, Gebäudetechnik, Informationstechnik oder auch Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen. Es ist sowohl für das Studium als auch für die anschließende Berufspraxis konzipiert und erleichtert den Einstieg in das Fachgebiet Elektrotechnik und in die elektrotechnischen Anwendungsgebiete. Als begleitendes Handbuch unterstützt dieses Buch auch die Berufstätigkeit und macht elektrotechnische Zusammenhänge verständlich.

Die Elektrotechnik spielt bei vielen Fragen der Gebäudetechnik eine wichtige Rolle wie beispielsweise bei der Gebäudeautomation und bei regenerativen Energiesysteme, deren Planung teilweise direkt mit der Gebäudeplanung verbunden ist.

Das vorliegende Lehrbuch soll das Vor- und Nacharbeiten der vorgestellten Themenschwerpunkte und Lehrinhalte erleichtern sowie ergänzende Hintergrundinformationen liefern. Auch wenn elektrotechnische Berechnungen im Rahmen der Gebäudeplanung in der Regel von Fachingenieuren oder im Falle kleinerer Bauvorhaben von Fachfirmen ausgeführt werden, sind doch die Lehrinhalte dieses Buches als Wissen für Studierende von Fächern wie Gebäudetechnik und Klimatechnik unverzichtbar und auch für Architekten und Bauingenieure zum Nachschlagen geeignet, wenn es auf ein Verständnis der Grundlagen der Elektrotechnik ankommt.

Dieses Lehrbuch behandelt schrittweise und verständlich zunächst die Grundlagen der Elektrotechnik und stellt sie in den Zusammenhang zur Technischen Gebäudeausrüstung und zur Energieumwandlung, Energieübertragung und Energieverteilung. Dabei wird die Bedeutung der Elektrotechnik für die gesamte gebäu-

detechnische Anlagenplanung erkennbar. Am besten gelingt das Verstehen der elektrotechnischen Grundlagen und Zusammenhänge, wenn Sie das Buch durcharbeiten und die Beispielaufgaben durchrechnen. Um den Stoff zu verstehen, müssen Sie üben, denn *Übung macht den Meister*.

Praxisnahe Beispiele in jedem Kapitel des Buches helfen, die Zusammenhänge zu erfassen. Im umfangreichen Literaturverzeichnis am Ende des Buches finden sich Empfehlungen für weiterführende Fachliteratur.

Die zweite Auflage wurde überarbeitet, didaktisch verbessert, und neue Themen, wie beispielsweise die Elektromobilität und LED-Technik aufgenommen.

Allen meinen Fachkollegen und Bekannten, die mich durch ihre Anregungen, Kritiken und Vorschläge unterstützt haben, möchte ich herzlich danken.

Besonders danke ich den Firmen ABB STOTZ, Siemens, Dehn + Söhne, Trilux und Hager für die Überlassung der technischen Unterlagen.

Dank gebührt auch dem Springer Vieweg Verlag und insbesondere Frau Karina Danulat für die Unterstützung bei der Veröffentlichung des Buches.

Beim Verfassen eines Buches lassen sich an der einen oder anderen Stelle Schreibfehler nicht vermeiden, wofür ich Sie um Nachsicht bitte. Bei Fragen, Wünschen und Anregungen wenden Sie sich bitte gern an mich.

Weinheim, im August 2018

Ismail Kasikci

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XXI
Abkürzungen	XXV
Indizes	XXVII
1 Einleitung	1
2 Einführung in die Elektrotechnik	5
3 Physikalische Größen und Einheiten	9
3.1 Physikalische Größen	9
3.2 Physikalische Gleichungen	11
3.3 Maß- und Einheitensysteme	13
4 Physikalische Grundbegriffe	17
4.1 Aufbau der Materie, Ladungen	17
4.2 Leiter, Halbleiter und Nichtleiter	21
4.3 Elektrischer Strom	23
4.4 Wirkungen des elektrischen Stromes	25
4.5 Beispiele: Stromstärke	26

4.5.1	Beispiel: Berechnung der Stromstärke	26
4.5.2	Beispiel: Berechnung der Ladung	27
4.6	Stromdichte	27
4.7	Beispiele: Stromdichte	28
4.7.1	Beispiel: Glühlampe	28
4.7.2	Beispiel: Fundamentender	28
4.8	Elektrische Spannung	29
4.9	Beispiele: Elektrische Spannung	31
4.9.1	Beispiel: Arbeit	31
4.9.2	Beispiel: Spannung	31
4.10	Elektrischer Widerstand	31
4.11	Beispiele: Elektrischer Widerstand	34
4.11.1	Beispiel: Stromkreiswiderstand	34
4.11.2	Beispiel: Leitwert	34
4.11.3	Beispiel: Widerstand eines Leiters	34
4.12	Strom- und Spannungszählpeile	35
4.13	Erzeuger- und Verbraucherzählpeile	35
4.14	Elektrische Leistung, Arbeit und Energie	35
4.15	Wirkungsgrad	36
4.16	Beispiele: Elektrische Leistung	37
4.16.1	Beispiel: Pumpe	37
4.16.2	Beispiel: Hebebühne	37
4.16.3	Beispiel: Lampen parallel	38
4.16.4	Beispiel: Lampen in Reihe geschaltet	38
4.17	Beispiele: Strom, Spannung und Widerstand	39
4.17.1	Beispiel: Widerstandswerte	39
4.17.2	Beispiel: Glühlampe	39
4.18	Analogiebetrachtungen	39

Inhaltsverzeichnis	IX
5 Grundgesetze der Elektrotechnik	41
5.1 Das Ohmsche Gesetz	41
5.2 Die Kirchhoffschen Gesetze	42
5.2.1 Erster Kirchhoffscher Satz (Knotenregel)	43
5.2.2 Beispiel zum 1. Kirchhoff'schen Satz	44
5.2.3 Zweiter Kirchhoffscher Satz (Maschenregel)	45
5.2.4 Beispiel zum 2. Kirchhoff'schen Satz	46
6 Berechnung von Gleichstromkreisen	49
6.1 Reihenschaltung von Widerständen	51
6.1.1 Beispiel: Reihenschaltung der Leitungen	52
6.1.2 Beispiel: Reihenschaltung	52
6.1.3 Beispiel: Berechnung der Quellenspannung	53
6.2 Parallelschaltung von Widerständen	54
6.2.1 Beispiel: Parallelschaltung aus der Praxis	55
6.2.2 Beispiel: Parallelschaltung	55
6.3 Stern-Dreieck-Umwandlung	56
6.4 Wheatstonesche Brückenschaltung	57
6.5 Thevenin-Theorem (Lineare Spannungsquelle)	58
6.6 Norton Theorem (Lineare Stromquelle)	59
6.7 Überlagerungssatz (Superpositionstheorem)	59
7 Elektrische Quellen	63
7.1 Ideale Spannungsquelle	64
7.2 Reale Spannungsquellen	64
7.3 Ideale Stromquellen	66
7.4 Reale Stromquellen	67
7.5 Zweipoltheorie	67
7.6 Leistungsbilanz im Grundstromkreis	68

8	Messungen der elektrotechnischen Größen	69
8.1	Messen der Stromstärke	70
8.2	Messung der Spannung und des Spannungsfalls	70
8.3	Spannungsquelle und Innenwiderstand	70
8.4	Leistungsmessung bei Drehstrom	71
9	Elektrische Felder	73
9.1	Das elektrische Strömungsfeld	74
9.2	Das elektrostatische Feld	76
9.2.1	Elektrische Spannung und Potential	78
9.2.2	Elektrische Verschiebungsdichte D	79
9.2.3	Verschiebungsstrom	80
9.2.4	Kondensator und Kapazität	80
9.2.5	Reihen- und Parallelschaltung von Kondensatoren	81
9.2.6	Parallelschaltung von Kondensatoren	82
9.2.7	Energie des elektrischen Feldes	83
9.2.8	Ladung und Entladung eines Kondensators	84
9.2.9	Anwendung von Kondensatoren	85
9.3	Beispiel: Reihen- und Parallelschaltungen	86
9.4	Beispiel: Gemischte Schaltung	86
10	Elektromagnetische Felder	87
10.1	Stationäres magnetisches Feld	87
10.2	Kraftwirkungen im elektromagnetischen Feld	89
10.3	Beispiel: Kräfte im magnetischen Feld	90
10.4	Bestimmung der Stromrichtung	91
10.5	Magnetische Feldgrößen	92
10.5.1	Magnetische Feldstärke H	92
10.5.2	Magnetische Flussdichte B	92

Inhaltsverzeichnis	XI
10.5.3 Magnetischer Fluss Φ	93
10.5.4 Durchflutungsgesetz	94
10.5.5 Magnetischer Kreis	95
10.6 Magnetische Eigenschaften der Materie	97
10.6.1 Wirkung des Ferromagnetismus	97
10.6.2 Wirkung des paramagnetischen Stoffes	98
10.6.3 Wirkung des Diamagnetismus	98
11 Veränderliche magnetische Felder	99
11.1 Das Induktionsgesetz	99
11.1.1 Rotatorische Induktion	101
11.1.2 Transformatorische Induktion	101
11.1.3 Lenzsche Regel	102
11.2 Induktivität und Selbstinduktion	103
11.3 Gegeninduktivität und Gegeninduktion	103
11.4 Zusammenschaltung von Induktivitäten	109
11.4.1 Reihenschaltung	109
11.4.2 Parallelschaltung	110
11.5 Beispiele: Magnetische Felder	110
11.6 Wirbelstrom und Skineffekt	111
11.6.1 Wirbelstrom	111
11.6.2 Skineffekt	111
11.7 Auf- und Entladevorgänge bei Induktivität	112
11.8 Magnetische Energie	113
11.9 Anwendung von Spulen	114
12 Grundbegriffe der Wechselstromtechnik	115
12.1 Kenngrößen von Wechselstrom	116
12.2 Einführung in das Rechnen mit komplexen Zahlen	119

12.2.1	Begriffe und Rechenregeln	119
12.2.2	Rechenregeln für komplexe Zahlen	120
12.3	Komplexe Größen der Wechselstromtechnik	121
12.4	Einfache Sinusstromkreise	122
12.4.1	Wechselspannung und -strom am Ohmschen Widerstand . .	122
12.4.2	Wechselspannung und -strom an einer Induktivität	123
12.4.3	Wechselspannung und -strom am Kondensator	123
12.5	Berechnung von Sinusstromnetzwerken	124
12.5.1	Reihenschaltung	124
12.5.2	Parallelschaltung	127
12.6	Leistungen im Wechselstromkreis	130
12.6.1	Blindstromkompensation	132
12.6.2	Leistungsfaktor	133
12.6.3	Beispiel: Leistungen	134
13	Drehstromtechnik	137
13.1	Arten der Drehstromsysteme, Bezeichnungen	137
13.2	Schaltungen der Drehstromsysteme	138
13.3	Schaltungen des Verbrauchers	144
13.4	Unsymmetrische Drehstromsysteme	146
13.5	Verkettungsfaktor	148
13.6	Leistungen in der Drehstromtechnik	148
13.7	Beispiel: Verbraucherströme	149
14	Normen und Vorschriften	151
14.1	Begriffe, Definitionen und Normen	151
14.2	Übersicht und Bedeutung über die Normen und Vorschriften . . .	154
14.2.1	DIN Deutsches Institut für Normung e.V.	154

14.2.2	DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik im DIN und VDE	155
14.2.3	DKE-Normungsarbeit	156
14.2.4	Arbeitsgruppen (Working Groups)	157
14.2.5	VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informations- technik e.V.	158
14.2.6	DIN-VDE-Normen	159
14.2.7	Institutionen, Verordnungen, Gesetze, Normen und techni- sche Vorschriften	159
15	Planung von Elektroanlagen	161
15.1	Art der Einspeisung	161
15.2	Leistungsbedarfsberechnung	162
15.3	Grundlagen der Elektromobilität	168
15.4	Elektrische Anlagen in Wohngebäuden	170
15.4.1	Begriffe	171
15.4.2	Elektrische Anlagen in Wohngebäuden DIN 18015 Teil 1 - Planungsgrundlagen	171
15.4.3	Elektrische Anlagen in Wohngebäuden DIN 18015 Teil 2: Art und Umfang der Mindestausstattung	177
15.4.4	Elektrische Anlagen in Wohngebäuden DIN 18015 Teil 3: Leitungsführung und Anordnung der Betriebsmittel	182
15.5	Elektrotechnische Anforderungen	185
16	Installationstechnik	187
16.1	Gesetzliche, behördliche und privatrechtliche Regelungen und Nor- men	187
16.2	Betriebsmittelvorschriften	191
16.2.1	Beleuchtung	191
16.2.2	Elektrische Installationen	192
16.2.3	Arbeitsplatzinstallationen	192

16.3 Starkstromanlagen	193
16.4 Empfangs- und Verteilanlage für Ton- und Fernsehrundfunk	197
16.5 Kommunikationsanlagen	198
16.6 Installationsbus (KNX/EIB)	198
16.7 Installationsplan	201
16.8 Übersichtsschaltplan	201
16.9 DIN Normen	204
16.9.1 Haus-Anschlusseinrichtungen nach DIN 18012	204
16.9.2 Zählerplätze für Elektrizitätszähler	205
16.9.3 Schutzpotentialausgleich	206
16.10 Erdungsanlagen nach DIN VDE 0100-540	210
16.10.1 Auswahl und Errichtung von Erdungsanlagen	211
16.10.2 Erdungsarten	212
16.10.3 Fundamenterder nach DIN 18014	212
16.11 Leitfaden für die Gebäudeplanung	213
17 Schutzkonzepte	217
17.1 Begriffe und Benennungen	217
17.2 Physikalische Einwirkungen	218
17.3 Physiologische Einwirkungen	219
17.4 Wirkungen des elektrischen Stromes	219
17.5 Schutzkonzept	220
17.6 Art der Erdverbindung, Schutz durch automatische Abschaltung .	220
17.6.1 TN-Systeme	222
17.6.2 TT-Systeme	223
17.7 Abschaltzeiten	224
17.8 Schutzklassen	225
17.9 Schutzart	226

17.10 Fehlerberechnung	227
17.10.1 Berechnung eines TN-Systems	227
17.10.2 Berechnung eines TT-Systems	228
18 Niederspannungsschutzeinrichtungen	231
18.1 Leitungsschutzschalter (MCB)	232
18.2 Planungsgrundlagen von Schutzgeräten	232
18.3 Schmelzsicherungen	235
18.4 RCD (Fehlerstromschutzschalter)	236
18.5 Auswahl und Installation von RCDs	237
18.6 Anwendung der RCD in Wohngebäuden	238
18.7 Hauptleitungs-Schutzschalter	239
18.8 Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtung (AFDD)	239
18.9 Leistungsschalter (MCCB)	241
18.10 Auslöser/Schutzfunktion des Leistungsschalters	242
19 Übertragungsmittel	245
19.1 Freileitungen	245
19.2 Kabel und Leitungen	246
19.3 Kurzschlussbelastbarkeit von Kabeln	251
20 Kenngrößen elektrischer Leitungen	253
20.1 Wirkwiderstand	253
20.2 Induktivität	254
20.3 Kapazität	255
21 Grundregeln der Kabeldimensionierung	257
21.1 Schutz von Kabeln und Leitungen	258
21.2 Allgemeine Anforderungen	259

21.3	Überstromanwendungen	261
21.4	Technische Anschlussbedingungen	261
21.5	Anordnung der Schutz-Einrichtungen	263
21.6	Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen	264
21.7	DIN VDE 0100-520 Beiblatt 2	272
21.8	Kabeldimensionierung	273
21.9	Funktionserhalt von Kabeln und Leitungen im Brandfall	275
21.9.1	Grundlegende Anforderungen	275
21.9.2	Funktionserhalt der Leitungen	275
21.9.3	Dauer des Funktionserhaltes	275
21.10	Kabelschottung	276
21.11	Kabeltragsysteme	277
21.12	Befestigungssysteme	277
21.13	Montagesysteme	278
21.14	Kabelrinnensysteme	278
21.15	Überbelegung einer Kabeltrasse	279
21.16	Brandschutz	280
21.17	Akustik	282
22	Spannungsfall in elektrischen Anlagen	283
22.1	Spannungsfall im Gleichstromnetz	284
22.2	Spannungsfall im Wechselstromnetz	285
22.3	Spannungsfall im Drehstromnetz	287
23	Erdungsanlagen	289
23.1	Begriffe	289
23.2	Erdungsarten	291
23.3	Bedeutung des Schutzpotentialausgleichs	296
23.4	Beispiele für Erdung	299

23.4.1	Beispiel: Erdung des Transformatorgebäudes	299
23.4.2	Beispiel: Erdung eines Gebäudes	300
24	Blitzschutzanlagen	301
24.1	Begriffe und Definitionen	301
24.2	Planung von Blitzschutzanlagen	304
24.3	Blitzschutzklassen	307
24.3.1	Erdungsanlage	309
24.3.2	Werkstoff, Form und Mindestmaße von Erdern	311
24.4	Trennungsabstand	316
24.5	EMV-Blitzschutzzonen-Konzept	318
24.5.1	Planungsangaben zu Überspannungsableitern	321
24.5.2	Anforderungsklassen für Überspannungsschutz- einrichtungen	322
24.6	Prüfungsmaßnahmen	323
24.7	Montagebeispiel	325
24.8	Dokumentation	326
25	Tages- und Kunstlicht	329
25.1	Begriffe und Definitionen	329
25.2	Beleuchtungskonzepte	332
25.3	Lichttechnische Gütemerkmale	334
25.4	Wartungswert der Beleuchtungsstärke	334
25.5	Beleuchtungsstärken	335
25.6	Begrenzung der Direktblendung	336
25.7	Beleuchtungsarten	337
25.7.1	Allgemeinbeleuchtung	337
25.7.2	Arbeitsplatzorientierte Allgemeinbeleuchtung	337
25.7.3	Einzelplatzbeleuchtung	337

25.8	Lichttechnische Anforderungen	337
25.9	Auswahl und Errichtung der Betriebsmittel	338
25.10	Beleuchtungsplanung	339
25.10.1	Berechnung mit der Lichtstärkemethode	340
25.10.2	Lichtstrommethode (Wirkungsgradverfahren)	341
25.10.3	Wirkungsgrade	343
25.10.4	Richtwerte für die Beleuchtungsplanung	343
25.11	Leuchten	343
25.12	Tageslichtplanung	344
25.13	Einführung in die LED Beleuchtung	351
26	Schaltanlagen	353
26.1	Transformatoren	353
26.1.1	Hauptbauformen	353
26.1.2	Belüftung von Transformatoren	355
26.2	Schaltanlagenräume	356
26.2.1	Druckentwicklung in Schaltanlagenräumen	356
26.2.2	Anordnung von Schaltfeldern	357
26.3	Niederspannungsanlagen	360
26.3.1	Verteileraufbau von NS-Schaltanlagen	361
26.3.2	Checkliste für NS-Schaltanlagen	363
27	Planung eines Wohngebäudes	365
27.1	Einleitung	365
27.2	Wohnsituation	365
27.3	Einspeisung	366
27.4	Übersicht des Verteilungssystems	366
27.5	Hausanschluss	366
27.6	Zählerplätze und Räume	366

27.7 Unterverteiler	369
27.8 Stromkreisverteilung	369
27.9 Festlegung des Ausstattungswertes	369
27.10 Kommunikationstechnik	370
27.11 Brandschutz und Sicherheitstechnik	370
27.12 Anschlusswerte und Verbraucher-Tabelle	370
27.13 Festlegung der Bemessungswerte von Leitungen	371
27.14 Erdungsanlagen	371
27.15 Blitzschutz	371
27.16 Auslegung der Unterverteiler	372
27.17 Zusätzlicher Schutz durch RCDs	372
27.18 Vergleich der Berechnungen mit Simaris	373
27.19 Ermittlung des Leistungsbedarfs	373
27.20 Auslegung der Endstromkreise	377
27.21 Dimensionierung der Anlage	377
27.22 Berechnung des Spannungsfalls	378
27.23 Berechnung der Abschaltbedingungen	379
27.24 Selektivität	381
 Literaturverzeichnis	 383
 Stichwortverzeichnis	 391

Formelzeichen

A	Fläche, Querschnitt
a	Beschleunigung, Abstand
B	magnetische Flussdichte
B	Blindleitwert
b	Breite
C	Kapazität oder Konstante
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
d	Durchmesser oder Abstand der Leiter
d	Abstand der Ladung Q1 zu Q2
D	elektrische Flussdichte
E	elektrische Feldstärke
e	Elementarladung
e	Basis des natürlichen Logarithmus
F	Kraft
f	Frequenz
G	Wirkleitwert, Leitwert
H	magnetische Feldstärke
H_c	Koerzitivfeldstärke
h	Höhe
I	elektrische Stromstärke
i	Augenblickswert des Stromes
j	imaginäre Einheit
J	Stromdichte
κ	spezifischer Leitwert
L	Induktivität
l	Länge
m	Masse
M	Drehmoment

N	Windungszahl
n	Drehzahl
P	Wirkleistung
Q	Blindleistung, elektrische Ladung
R	elektrischer Widerstand
r	Radius
S	Scheinleistung
S	Querschnitt
s	Streufaktor
T	Periodendauer
t	Zeit
U	elektrische Spannung
u	Augenblickswert der Spannung
V	Volumen
v	Geschwindigkeit
W	Energie, Arbeit
W_m	magnetische Feldenergie
X	Blindwiderstand, Reaktanz
Y	Scheinleitwert
$\underline{Y}$	komplexer Leitwert (Admittanz)
Z	Scheinwiderstand, Impedanz
$\underline{Z}$	komplexer Widerstand (Impedanz)
α	Winkel
ϵ	Permittivität
ϵ_0	elektrische Feldkonstante
ϵ_r	Permittivitätszahl
η	Wirkungsgrad
Θ	Durchflutung
ϑ	Temperatur
λ	Leistungsfaktor
Λ	magnetischer Leitwert
μ	Permeabilität
μ_0	magnetische Feldkonstante
μ_r	Permeabilitätszahl
ρ	Dichte
ρ	spezifischer Widerstand
σ	Streuung
τ	Zeitkonstante
Φ	magnetischer Fluss
φ	Potential, Phasenwinkel
Ψ	elektrischer Fluss
ω	Winkelgeschwindigkeit

ω	Kreisfrequenz
κ	spezifischer Leitwert, Stoßfaktor
ρ_m	Dichte des Leitungsmaterials
$\cos \varphi$	Verschiebungsfaktor, Wirkfaktor
$\sin \varphi$	Blindfaktor

Abkürzungen

<i>Al</i>	Aluminium
<i>As</i>	Arsen
<i>ASR</i>	Arbeitsstättenrichtlinien
<i>B</i>	Bor
<i>BGV</i>	Berufsgenossenschaftliche Vorschriften
<i>BKZ</i>	Baukostenzuschuss
<i>CEE</i>	Commission on the Rules for the Approval of the Electrical Equipment (Steckersystem)
<i>Cl</i>	Clor
<i>CGPM</i>	Generalkonferenz für Maß und Gewicht
<i>DIN</i>	Deutsches Institut für Normung
<i>DS</i>	Dauerschaltung
<i>EMV</i>	Elektromagnetische Verträglichkeit
<i>ETSI</i>	European Telecommunications Standards Institute
<i>Ga</i>	Gallium
<i>G</i>	Generator
<i>HAK</i>	Hausanschlusskasten
<i>HEK</i>	Haupterdungsklemme
<i>HOAI</i>	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
<i>In</i>	Indium
<i>K, L, M, N</i>	Schale des Atommodells
<i>KNX</i>	Feldbus für die Gebäudeautomation
<i>LS</i>	Leistungsschalter
<i>LTS</i>	Lasttrennschalter
<i>LED</i>	Leuchtdioden
<i>LWL</i>	Lichtwellenleiter
<i>MCB</i>	Leitungsschutzschalter
<i>MLAR</i>	Muster Leitungsanlagen Richtlinie

<i>MSR</i>	Mess,- Steuer- und Regelungstechnik
<i>Na</i>	Natrium
<i>NB</i>	Netzbetreiber
<i>NS</i>	Niederspannung
<i>NTC</i>	Heißeiter
<i>PTC</i>	Kaltleiter
<i>P</i>	Phosphor
<i>RCD</i>	Fehlerstrom-Schutzeinrichtung
<i>Si</i>	Silizium
<i>Sb</i>	Antimon
<i>SI</i>	internationales Einheitensystem
<i>SA</i>	Schutzart
<i>SK</i>	Schutzklasse
<i>SPA</i>	Schutzpotentialausgleich
<i>SS</i>	Sammelschiene
<i>UGR</i>	Unified Glare Rating-Verfahren (Blendwert)
<i>USV</i>	Ununterbrochene Stromversorgung
<i>ÜSE</i>	Überstromschutz-Einrichtung
<i>UW</i>	Umspannwerk
<i>TN</i>	Art der Erdung
<i>TT</i>	Art der Erdung
<i>V</i>	Verbraucher
<i>VdS</i>	Verband deutscher Sachversicherer

Indizes

ac	Wechselstrom (Alternating Current)
dc	Gleichstrom (Direct Current)
e	Elektron
f	fiktiv
n	Nennwert
r	Bemessungswert
G	Generator, Wirkleitwert, Gesamt
HV	Hochspannung (High Voltage)
LV	Niederspannung (Low Voltage)
L	Leitung
K	Kabel, Kurzschluss
L1, L2, L3	Leiter des Drehstromnetzes
N	Neutralleiter
M	Motor
MV	Mittelspannung (Medium Voltage)
N	Neutralpunkt des Drehstromnetzes
p	Proton
Q	Anschlusspunkt der Netzeinspeisung
str	Strang
T	Transformator
—	Gleichstrom
~	Wechselstrom
Δ	Dreieckschaltung
Y	Sternschaltung



1 Einleitung

Die integrierte Planung von Gebäuden umfasst die Konzeption, Planung, Vorbereitung und Koordination der Ausführung, den Betrieb sowie die Modernisierung gebäudetechnischer und gebäudeklimatischer Systeme. Eine besondere Herausforderung ist dabei die Abstimmung der einzelnen Gewerke untereinander.

Dazu gehören im Wesentlichen Heizung, Lüftung, Klima- und Kältetechnik, Brandschutz, Einbruchschutz, Gebäudeleittechnik und elektrische Energieverteilung. Das Gebäude muss dabei ganzheitlich betrachtet und die Funktionalität der Prozesse definiert werden.

Die Gebäudeautomatisierung und der Vernetzungsgrad zwischen den einzelnen Gewerken nehmen immer stärker zu. Dadurch können die Kosten für Investor, Nutzer und Betreiber des Gebäudes reduziert werden. Während der Planung eines Vorhabens müssen die Elektroinstallationen von Anfang an berücksichtigt werden.

Dieses Buch soll den Architekten, Bauingenieuren und Gebäudetechnikern helfen, die Komponenten der elektrischen Gebäudeausrüstung, der Energieverteilung und der Energieverbraucher besser zu verstehen.

Die nachfolgende Zusammenstellung gibt einen Überblick über die Teilgewerke der Elektrotechnik mit Anmerkungen [1], [2].

1. Mittelspannungsanlagen (Standort und Spannungshöhe),
2. Transformatoren (Standort und Bemessungsleistung),
3. Niederspannungshauptverteilungen (Standort und Abmessungen),
4. Kabel und Leitungen (Länge und Querschnitte),
5. Netzersatzanlagen/USV (Standort, Verbraucherart und Anschlussleistungen),
6. Erdungsanlagen und Schutzpotentialausgleich (Erdungsart),
7. Verlegesysteme von Kabel und Leitungen,
8. Installationsgeräte (Anforderungen),

9. Gebäudeautomation/Bussysteme (Schnittstellen, Anzahl der Daten, Art der Mess- und Regeltechnik),
10. Sonnenschutz (Steuerung und Umfang),
11. Blitzschutzanlagen, Überspannungsschutz (Anforderungen, Integration in das Gebäude)
12. Allgemeinbeleuchtung/Tageslichtnutzung (Anschlussleistungen, Raumplan),
13. Sicherheitsbeleuchtung (Anschlussleistungen, Raumplan),
14. Brandschutz- und Einbruchmeldeanlagen (Standort und Leistung),
15. Zutrittskontrollen/Zeiterfassung,
16. Antriebstechnik (Anschlussleistungen, Aufzüge, Pumpen, Anlaufverhalten)
17. Sprechanlagen (Anschlussleistungen, Ort),
18. ELA-Anlagen (Anschlussleistungen, Ort),
19. TV- und Antennenanlagen (Anschlussleistungen, Ort),
20. Uhrenanlagen (Anschlussleistungen, Ort),
21. LAN-Schränke und Datentechnik (Anschlussleistungen, Ort),
22. Heizung, Lüftung und Klimatechnik (elektrische Leistung, Standort).

Bild 1.1 gibt einen Gesamtüberblick der Systemkomponenten der wichtigsten konventionellen Betriebsmittel elektrischer Energieversorgungsnetze, die zu Beginn erläutert werden. Die einfache Beschreibung und Zusammenhänge wird in den darauf folgenden Kapiteln vermittelt.

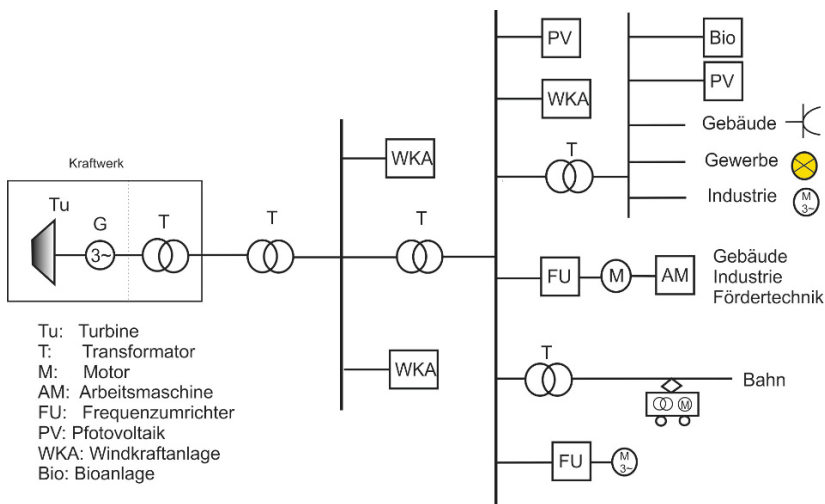


Bild 1.1: Elektrische Energiewandlung

Elektrische Energie wird in Kraftwerken durch Energieumwandlung bereitgestellt. Dabei werden Drehstromgeneratoren durch Wasser-, Dampf-, Gas- oder Windturbinen angetrieben. Die Spannung des Generators wird dann durch Blocktransformatoren hochtransformiert und über Übertragungsfreileitungen übertragen. Die Netztransformatoren verbinden die Verteilungsnetze mit unterschiedlichen Spannungen der Verbrauchieranlagen. Der größte Teil der erzeugten Elektroenergie wird in Beleuchtungsanlagen und in elektrischen Asynchronmotoren in mechanische Energie umgewandelt.

Der Drehstrom-Transformator ist ein Betriebsmittel zur Übertragung und zum Transport von elektrischer Energie. Er besteht aus galvanisch getrennten Wicklungen auf einem Eisenkern, der mit einem oberen und unteren Joch miteinander verbunden ist. Die Transformatoren werden als Öl- oder Trockentransformatoren hergestellt.

Zur Übertragung dienen die Freileitungen, Kabel oder Sammelschienen. Bei Hoch- und Höchstspannungsleitungen werden Aluminium-Stahl-Seile verwendet. Die Bauform und das Material der Freileitungsmasten sind Holz-, Beton- und Stahlgittermasten. In Niederspannungsanlagen kommen Starkstrom-Kabel aus Kupfer oder Aluminium zum Einsatz. Die Grundtypen von Starkstrom-Kabeln sind Einleiter-Kabel, Gürtel-Kabel und Dreimantel-Kabel.

Kondensatoren werden in elektrischen Energieversorgungsnetzen zur Blindleistungskompensation eingesetzt. Der Leistungsfaktor der Anlage wird mindestens nach technischen Anschlussbedingungen (TAB) auf 95% erhöht. In Hochspannungsnetzen kommen reihen- oder parallel geschaltete Kondensatoren vor.

Für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb einer Energieversorgungsanlage müssen außerdem Schalt- und Schutzgeräte wie Leistungsschalter, Lastschalter, Trenner und Sicherungen installiert werden.

Weitere Betriebsmittel sind die Stromrichter, die in der Leistungselektronik zum Einsatz kommen. Gleich- oder Wechselrichter bei PV-Anlagen, Windkraftanlagen, USV-Anlagen oder Haushaltgeräte sind heute nicht mehr wegzudenken.

Im **Bild 1.2** ist ein Niederspannungssystem beispielhaft mit einem Motor und einer Steckdose gezeigt, die zwischen den Außenleitern bzw. dem Außenleiter und dem Neutralleiter angeschlossen sind. Eine Niederspannungsanlage wird normalerweise von der Hochspannung mit 20 kV oder 10 kV versorgt. Die Transformatoren werden direkt geerdet. Das Energieversorgungssystem wird entweder mit einem Vierleiter- oder Fünfleiter-System herausgeführt. Die Niederspannung beträgt 400 V/230 V, 50 Hz.

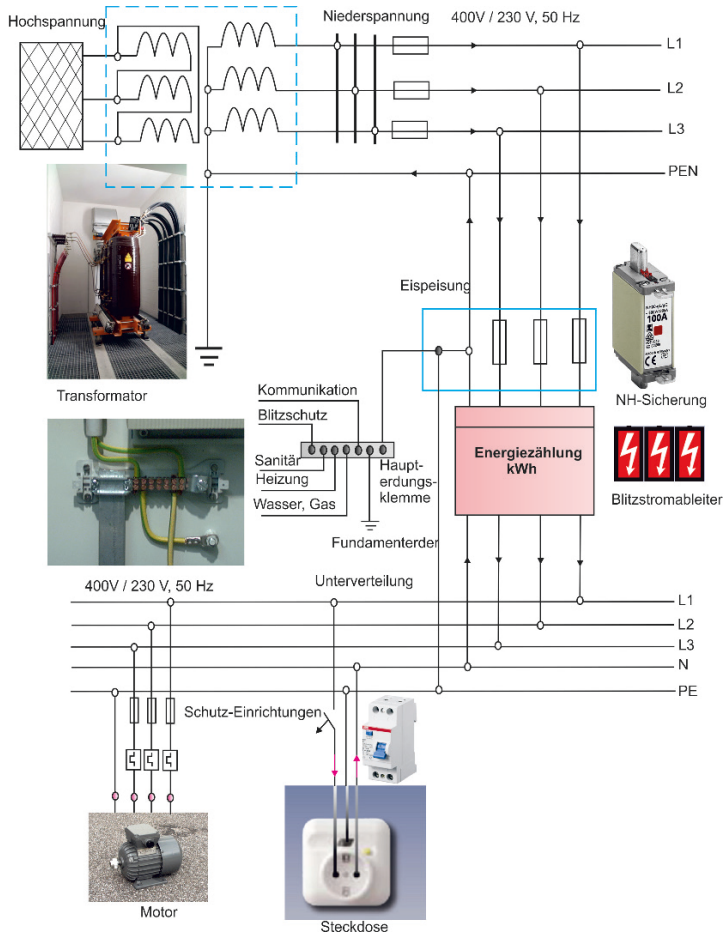


Bild 1.2: Drehstromsystem



2 Einführung in die Elektrotechnik

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen der Elektrotechnik beschrieben und ein Überblick über die Zusammenhänge der einzelnen Komponenten gegeben [1], [3], [5].

1. die elektrischen Komponenten der Elektrotechnik,
2. die Bedeutung der Elektrizität,
3. die Anwendungsgebiete der Elektrizität und
4. die Grundformeln.

Elektrotechnik und Mathematik sind zwei Fächer, vor denen man als Student und Studentin am meisten Angst hat. Elektrotechnik kann man nicht mit unseren Sinnesorganen wahrnehmen. Die elektrischen und magnetischen Erscheinungen der Elektrotechnik sind überall sichtbar. Ihre Auswirkungen erleben wir tagtäglich im Haushalt und in der Industrie.

Wir alle kennen die Begriffe **Strom**, **Spannung**, **Widerstand** und **Leistung**. Sie werden auch außerhalb der Elektrotechnik im täglichen Leben verwendet. Wir wissen auch, dass Strom sehr nützlich, aber auch gefährlich ist, wenn man mit ihm in Berührung kommt.

Wie kann man Elektrotechnik beschreiben?

Elektrotechnik ist die Wissenschaft von der technischen Anwendung der Elektrizität. Wir können nur die Auswirkungen erkennen.

Was ist die Elektrizität?

Elektrizität beschreibt alle Vorgänge und Erscheinungen in der Natur und in der Technik, die von elektrischen Ladungen und Strömen und damit verbundenen elektrischen und magnetischen Feldern hervorgerufen werden. Schon die alten

Griechen kannten die Kraftwirkungen geriebenen Körper mit Bernstein (**griechisch:** $\varepsilon\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\omicron\nu$, **elektron**). Damit ist die **Ladung** der Kernstoff und der Anfang aller elektrischen Erscheinungen.

Um die Elektrotechnik verstehen zu können, brauchen wir ein Medium, mit dem wir die Zusammenhänge der Elektrotechnik erklären können. Es gibt daher viele Möglichkeiten, um die Ursachen und Wirkungen der Elektrotechnik und ihrer Erscheinungen mit mathematischen Formeln, Diagrammen und elektrischen Schaltplänen zu beschreiben. Sie sehen, dass die Elektrotechnik ohne Mathematik nicht beschrieben werden.

Eine elektrische Schaltung besteht z.B. aus Spannungsquellen, Stromquellen, Widerständen, Spulen, Kondensatoren, Transformatoren, Motoren, Dioden, Transistoren usw. Wenn man diese Bauelemente miteinander verbindet erkennt man ihre Effekte und Wirkungen.

Die Theorie und die Grundlagen der Elektrotechnik wurde vom Englischen Physiker James Clerk Maxwell (1831-1879) definiert und in seinem 1873 in Oxford erschienenem Buch "**A Treatise on Electricity and Magnetism**" dargelegt. Dabei hat er die elektrischen und magnetischen Wechselwirkungen zur elektromagnetischen Kraft zusammengefasst und die von ihm genannten fünf Gleichungen erstellt. Er hat zum ersten Mal das elektrische Feld beschrieben. Das Feld ist ein Raum, in dem sich die Träger der elektrischen Ladungen befinden.

Was sind die Ladungen?

Diese Frage werden wir später ausführlich erklären. Die Verknüpfung zwischen den elektrischen und magnetischen Feldern von Maxwell führte zu den folgenden Ergebnissen (seine Gleichungen werden in diesem Buch nicht beschrieben):

1. Zwei Feldgleichungen

- Maxwellsche Gleichung $\Rightarrow$ Durchflutungsgesetz,

Die Wirkung einer Spule ist von der Stromstärke, der Windungszahl und der Weglänge abhängig. Das Produkt aus Windungszahl und Stromstärke wird als elektrische Durchflutung bezeichnet (**Bild 2.1**).

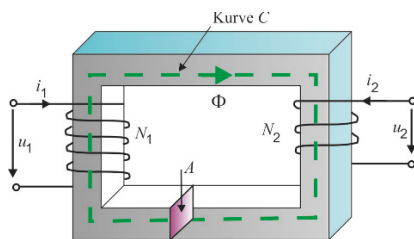


Bild 2.1: Durchflutung

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_A (\vec{S} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot d\vec{A} \quad (2.1)$$

– Maxwellsche Gleichung $\Rightarrow$ Induktionsgesetz,

Die induzierte elektrische Spannung $u(t)$ ist proportional der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses Φ (**Bild 2.2**). Sie ist die wichtigste Grundlage zur Spannungserzeugung.

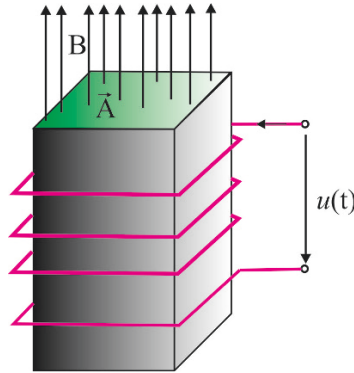


Bild 2.2: Induktionsgesetz

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} \quad (2.2)$$

2. zwei Kontinuitätsgleichungen als 3. und 4. Maxwellsche Gleichung (**Bild 2.3**). Diese sind

- Quellenfelder $\Rightarrow$ elektrische Felder (Kondensatoren) und
- Wirbelfelder $\Rightarrow$ magnetische Felder (Spulen).

$$\oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q \quad \oint_A \vec{B} \cdot \vec{A} = 0 \quad (2.3)$$

3. drei Materialgleichungen (Zusammenhang zwischen Feldstärke und Flussdichte (**Bild 2.4**).

$$\vec{S} = \kappa \cdot \vec{E}, \quad \vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (2.4)$$

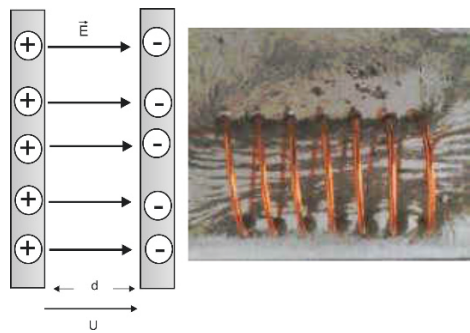


Bild 2.3: Elektrisches und magnetisches Feld

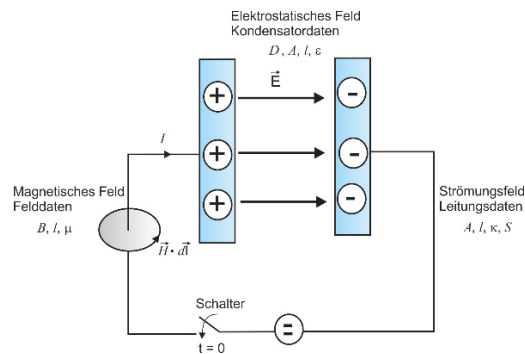


Bild 2.4: Materialgleichungen

3 Physikalische Größen und Einheiten

In diesem Kapitel werden folgende Themen behandelt [3], [4]:

1. die physikalischen Größen,
2. die Maß- und Einheitensysteme und
3. die SI-Einheiten.

In jedem Fachgebiet gibt es Größen, Einheiten und Begriffe, die man beschreiben und verstehen muss. In der Elektrotechnik ist es genauso.

3.1 Physikalische Größen

Wir unterscheiden zwischen den messbaren Größen wie Strom 10 A, Spannung 230 V, Widerstand 2 Ω , Temperatur 30°C, Länge 15 m und nicht messbaren Größen wie Behaglichkeit und Geschmack. Nach DIN 1338 werden die physikalischen Größen vereinfacht durch Symbole (Buchstaben) dargestellt (**Tabelle 3.1**).

Tabelle 3.1: Allgemeine Formelzeichen

Physikalische Größe	Formelzeichen
Fläche	A
Länge	l
Kraft	F
Leistung	P
Widerstand	R
Strom	I

Der Wert einer physikalischen Größe wird durch das Produkt aus **Zahlenwert** und der für diese Größe eingeführten **Einheit** dargestellt.

Physikalische Größe (Größenwert) = Zahlenwert · Einheit

Beispiel: $l = 15 \text{ m}$, $R = 100 \Omega$

Die Schreibweise der Zahlen und Einheiten ist definiert. Die Zahl 15 wird mit der Einheit m mit Leerzeichen geschrieben. Die Schreibweisen $15 \cdot \text{m}$ oder 15m sind demnach falsch. Die Größe l wird Formelzeichen für die Länge genannt. Einheiten werden nicht kursiv geschrieben. Wenn man *Zahlenwert* und *Einheit* getrennt angeben will, sind diese in geschweifte und eckige Klammern zu setzen.

$$l = \{l\} \cdot [l]$$

$$\{l\} = 15, [l] = \text{m}$$

Innerhalb vollständiger Sätze sollten Einheitenamen ausgeschreiben werden.

Die Entfernung beträgt zwanzig Kilometer. Nicht: Die Entfernung beträgt zwanzig km.

In einer Größenbenennung darf keine Einheit vorkommen, wie Masse durch Kubikmeter oder Masse je Volumeneinheit.

Ein Satz mit einer Formel endet mit einem Punkt.

Beispiel: Das Ohmsche Gesetz ist gegeben durch $U = R \cdot I$.

Andere Schreibweisen: m/s^2 oder $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, aber nicht m/s/s

Falsch: $20 \times 20 \text{ m}$, richtig $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$

Falsch: $20 \text{ bis } 50 \text{ m}$, richtig $20 \text{ m bis } 50 \text{ m}$.

Vorsicht: Das Malkreuz ($\times$) wird nur bei Abmessungen und Formaten benutzt, nicht in Formeln.

$$U_{\max} = 1000 \text{ V nicht } U = 1000 V_{\max}$$

Gerichtete Größen, Vektoren:

Gerichtete physikalische Größen sind Vektoren, die mit einem Pfeil über dem Formelzeichen gekennzeichnet werden. In alten Lehrbüchern werden Vektoren mit deutschen Buchstaben dargestellt. In Druckwerken findet man Vektoren auch in fett oder kursiv ausführt.

$$F = |\vec{F}|$$

Zeitabhängige Größen:

Mit großen Buchstaben werden Gleichstromgrößen und Effektivwerte bezeichnet. Zeitabhängige Größen erhalten in der Regel kleine Buchstaben als Formelzeichen.

$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t)$$

Komplexe Größen:

Im Gegensatz zur theoretischen Mathematik erhält die physikalische Größe zur Kennzeichnung einer komplexen Zahl einen waagerechten Strich unterhalb des Formelbuchstabens.

$$Z = |\underline{Z}|$$

Formelzeichen:

Das Formelzeichen wird kursiv und Indizes gerade dargestellt.

$$I_k$$

Graphische Darstellungen (Bild 3.1):

Bei den graphischen Darstellungen ist DIN 461 zu beachten. Häufigste Fehler sind:

1. Die Beschriftung ist zu klein.
2. Einheiten werden in eckige Klammern gesetzt.
3. Formelzeichen werden kursiv mit Serifen geschrieben.

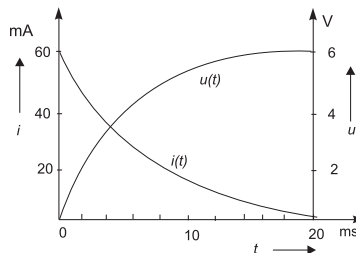


Bild 3.1: Kurvendarstellungen

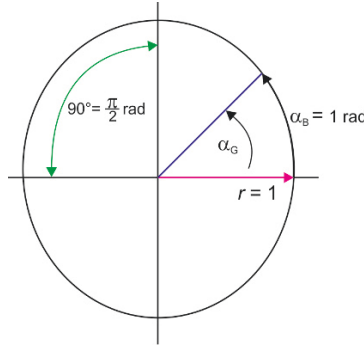
Einheitskreis:

Der Winkel kann im Grad- oder Bogenmaß angegeben werden (**Bild 3.2**). Dem Winkel α können die trigonometrischen Funktionen zugeordnet werden, z.B. $\sin\alpha$, $\cos\alpha$ oder $\tan\alpha$. Radiant ist die Einheit im Bogenmaß. Es gilt:

$$\alpha_G = \frac{\alpha_B \cdot 360^\circ}{2\pi rad}$$

3.2 Physikalische Gleichungen

Die Vorgänge in der Elektrotechnik werden durch Grundgleichungen und Definitionsgleichungen beschrieben [5], [7].

**Bild 3.2:** Einheitskreis

1. Grundgleichungen

Physikalische Grundgleichungen beschreiben die Gesetzmäßigkeiten, die aus der Beobachtung von Naturvorgängen gewonnen werden.

Beispiel: Kraft zwischen zwei ruhenden Ladungen (Coulombsches Gesetz)

$$F = k_1 \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad (3.1)$$

Die Kraft F zwischen zwei geladenen Körpern ist proportional zu deren Ladungen Q_1 und Q_2 und umgekehrt proportional zum Quadrat r^2 ihrer Entfernung. Dieses Gesetz gilt nur dann exakt, wenn der Abstand der Körper groß gegenüber deren Abmessungen ist.

Beispiel: Kraft zwischen zwei von gleichen Strömen durchflossenen parallelen Leitern

$$F = k_2 \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{r} \quad (3.2)$$

Die Kraft F zwischen zwei parallelen, von den Strömen I_1 bzw. I_2 durchflossenen Leiterabschnitten der Länge l ist proportional zum Produkt $I_1 \cdot I_2$ der Ströme, zur Länge l und umgekehrt proportional zur Entfernung r .

2. Definitionsgleichungen

Physikalische Definitionsgleichungen definieren neue Größen durch zweckmäßiges Verknüpfen bekannter Größen.

Beispiel: Geschwindigkeit als erste Ableitung des zurückgelegten Weges nach der Zeit bzw. Beschleunigung als erste Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit

$$v = \frac{ds}{dt} \tag{3.3}$$

$$a = \frac{ds}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} \tag{3.4}$$

Man könnte die physikalischen Vorgänge auch ohne diese zusätzlichen Größen beschreiben, allerdings wären die Gleichungen dann unhandlicher. Bezüglich der Darstellung und des Rechnens mit Gleichungen lassen sich unterscheiden:

- Größengleichungen
- Zahlenwertgleichungen
- Einheitengleichungen

3.3 Maß- und Einheitensysteme

In Naturwissenschaft und Technik werden die quantitativen Zusammenhänge bestimmt durch physikalische Gleichungen. Diese Gleichungen sind teils Grundgleichungen, teils Definitionsgleichungen, in denen verschiedene Größen auftreten. Diese Größen nennt man Basisgrößen. Sie bilden ein Größensystem. Die Einheiten der restlichen Größen (Definitionsgrößen) heißen Definitionseinheiten und folgen aus den physikalischen Gleichungen aus den Einheiten der Basisgrößen. Die Definitionen der Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems wurden festgelegt. Aus ihnen lassen sich alle übrigen Einheiten ableiten. Die derzeit gültigen SI-Basiseinheiten sind in der folgenden **Tabelle 3.2** aufgeführt.

Tabelle 3.2: Internationales Einheitensystem (Système International d’Unités, SI)

Basisgröße	Basiseinheiten	
Länge	l	Meter (m)
Masse	m	Kilogramm (kg)
Zeit	t	Sekunde (s)
Strom	I	Ampere (A)
Temperatur	T	Kelvin (K)
Stoffmenge	n	Mol (mol)
Lichtstärke	I	Candela (cd)

Diese sieben Basiseinheiten sind wie folgt definiert:

1. **Meter:** Das Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von $1/299.792.458$ Sekunden durchläuft.
2. **Kilogramm:** Das Kilogramm ist die Einheit der Masse; es ist gleich der Masse des Internationalen Kilogrammprototyps.
3. **Sekunde:** Die Sekunde ist das 9192631770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids $133 - Cs$ entsprechenden Strahlung.
4. **Ampere:** Das Ampere ist die Stärke eines konstanten elektrischen Stromes, der, durch zwei parallele, geradlinige, unendlich lange und im Vakuum im Abstand von 1 Meter voneinander angeordnete Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fließend, zwischen diesen Leitern pro 1 Meter Leiterlänge die Kraft $2 \cdot 10^{-7}$ Newton hervorrufen würde.
5. **Kelvin:** Das Kelvin, die Einheit der thermodynamischen Temperatur, ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers. Im Tripelpunkt existieren alle drei Phasen eines Stoffes (fest, flüssig, gasförmig) gleichzeitig.
6. **Mol:** Das Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebensoviel Einzelteilchen besteht, wie Atome in 0,012 Kilogramm des Kohlenstoffnuklids ^{12}C enthalten sind. Bei Benutzung des Mols müssen die Einzelteilchen spezifiziert sein und können Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen sowie andere Teilchen oder Gruppen solcher Teilchen genau angegebener Zusammensetzung sein.
7. **Candela:** Die Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung $1/683$ Watt pro Steradian beträgt.

Das SI-System reicht für das gesamte Gebiet der Physik und der Elektrotechnik aus.

Tabelle 3.3 zeigt die wichtigsten Ableitungen der elektrischen Einheiten.

Tabelle 3.3: Ableitung der elektrischen Einheiten

Größen	Formelzeichen	Einheiten	Benennung
Kraft	F	$1\text{N} = 1\text{kgm/s}^2$	Newton
Energie	W	$1\text{J} = 1\text{kgm}^2/\text{s}^2$	Joule
Leistung	P	$1\text{W} = 1\text{kgm}^2/\text{s}^3$	Watt
Spannung	V	$1\text{V} = 1\text{kgm}^2/\text{As}^3$	Volt
Widerstand	R	$1\Omega = 1\text{V/A}$	Ohm
Kapazität	C	$1\text{F} = 1\text{As/V}$	Farad
Induktivität	L	$1\text{H} = 1\text{Vs/A}$	Henry

Die Bezeichnungen, Größenordnungen und Abkürzungen sind in **Tabelle 3.4** dargestellt.

Tabelle 3.4: Dekadische Vielfache und Teile der elektrischen Einheiten

Zehnerpotenz	Name	Zeichen
10^{15}	Peta	P
10^{12}	Tera	T
10^9	Giga	G
10^6	Mega	M
10^3	Kilo	k
10^{-3}	Mili	m
10^{-6}	Mikro	μ
10^{-9}	Nano	n
10^{-12}	Piko	p
10^{-15}	Femto	f

4 Physikalische Grundbegriffe

In diesem Kapitel werden folgende Themen behandelt [3], [5]:

1. der Aufbau der Materie,
2. die Stromdichte, der Widerstand und die Spannung,
3. die Zählpfeile und
4. der Wirkungsgrad.

4.1 Aufbau der Materie, Ladungen

Aufbau der Materie:

Alle Stoffe sind aus Atomen aufgebaut, die man zunächst als nicht weiter aufteilbare und nicht umwandelbare kleinste Einheiten der Materie betrachtet.

Aufbau der Atome:

Vereinfacht man das heute von der Physik (Atomphysik, Kernphysik) angebotene Atombild soweit, kann man sich den Aufbau der Atome folgendermaßen vorstellen:

Atome bestehen aus einem Kern, der aus Neutronen und Protonen aufgebaut ist, und aus einer Hülle, die aus um den Kern kreisenden Elektronen besteht. Diese Beschreibung ist der Grundgedanke des Bohrschen Atommodells.

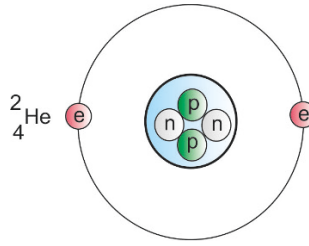
Die verschiedenen chemischen Elemente unterscheiden sich durch die Anzahl der Protonen in ihren Atomkernen. Isotope des gleichen Elements haben eine gleiche Protonenzahl, aber eine unterschiedliche Neutronenzahl.

Wir betrachten als Beispiel das Heliumatom mit folgenden Elementarladungen und Massen (**Bild 4.1**):

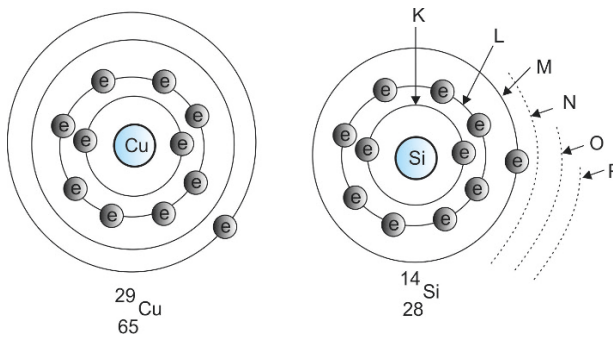
Das Proton hat eine Ladung von $Q_p = +1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$, $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Das Neutron hat keine Ladung $m_n = 1,6747 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Das Elektron hat eine Ladung von $Q_e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$, $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

**Bild 4.1:** Heliumatom

Die Zahl der Nukleonen ist gleich der Summe der Protonen und Neutronen und wird als Atomgleichgewicht bezeichnet. Die Zahl der Protonen ist die Kernladungszahl oder Ordnungszahl. **Bild 4.2** zeigt das Kupferatom und Siliziumatom mit dem Bohrschen Atommodell mit den Schalen K, L, M, N, O und P.

**Bild 4.2:** Kupferatom und Halbleiter-Silizium

Die äußere Schale bestimmt das chemische und physikalische (elektrische) Verhalten des Atoms, auf der sich die freibeweglichen Valenzelektronen aufhalten, die für den elektrischen Strom genutzt werden können.

Die Anzahl der Elektronen in der Hülle ist stets gleich der Anzahl der Protonen im Kern, da Atome elektrisch neutral sind.

Als wesentliche Grundbestandteile ihrer Atome bzw. Moleküle enthalten alle Stoffe Elektronen und Protonen, und damit negative und positive Ladungsträger. Die verschiedenen Stoffe unterscheiden sich dadurch, dass die Ladungsträger mehr oder weniger beweglich sind.

Stoffe, in denen Ladungsträger praktisch nicht frei beweglich sind, heißen Nichtleiter oder Isolatoren. Stoffe, in denen die Ladungsträger sehr gut frei beweglich ist, heißen Leiter.

Was ist Ladung?

Ladung besteht aus zählbaren Elementarladungen, deren Träger Bestandteile der Atome oder Moleküle sind.

Sie wird als Elementarladung Q bezeichnet und mit der Einheit $[Q] = 1\text{ C}$ hat den Betrag:

$$Q_p = e = +1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$$

Ein Coulomb ist diejenige elektrische Ladung, die bei einer Stromstärke von einem Ampere in jeder Sekunde durch den Leiterquerschnitt fließt.

Die Ladung eines Elektrons ist gleich der negativen Elementarladung.

$$Q_e = -e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$$

Der Atomkern enthält zwei Arten von Teilchen:

1. Protonen (mit positiver Ladung = Ordnungszahl)
2. Neutronen (ungeladene Teilchen, ohne elektrische Ladung)

Die Ladung eines Protons ist die kleinste Ladungsmenge.

Gleichnamige geladene Körper stoßen sich ab, ungleichnamige geladene Körper ziehen sich an (**Bild 4.3**). Die Ladungen sind an Ladungsträger gebunden und nicht unendlich teilbar.

Die Größe der Elementarladung lässt sich durch folgende Vorstellung veranschaulichen:

Fließt ein Elektron je Sekunde durch den Querschnitt einer Leitung, so beträgt die Stromstärke

$$I = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A}$$

Mit empfindlichen Strommessern lassen sich heute Ströme, die kleiner als 10^{-16} A sind, nachweisen. Das entspricht rund:

$$10^{-16} = \frac{n \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}}{s}$$

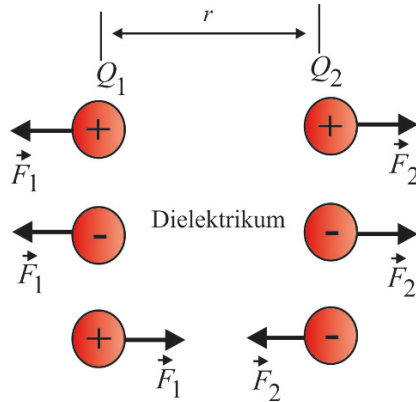


Bild 4.3: Ladungen

$n \approx 6250 \text{ Elektronen/s}$ und $n \approx 6 \text{ Elektronen/ms}$

Eine Ladungsmenge von $Q = 1 \text{ As}$ enthält insgesamt:

$$n = Q/e = (1\text{As})/(1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As})$$

und

$$n \approx 6,3 \cdot 10^{18}$$

Elektronen.

Beispiel: Anzahl der Elektronen

Wie viele Elektronen bewegen sich in 1 Sekunde durch den Querschnitt eines Leiters, wenn 1 A fließt?

$$Q = I \cdot t = 1\text{As}$$

$$Q = N \cdot e$$

$$N = \frac{Q}{e} = \frac{1\text{As}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}}$$

$$N = 6,24 \cdot 10^{18}$$

Elektronen.

4.2 Leiter, Halbleiter und Nichtleiter

Alle Stoffe (**Bild 4.4**) enthalten als Grundbestandteile ihrer Atome bzw. Moleküle u.a. Elektronen und Protonen und damit negative und positive Ladungsträger. Die verschiedenen Stoffe unterscheiden sich dadurch, dass die Ladungsträger mehr oder weniger beweglich sind.

Ib	IIb	III	IV	V	VI	VII	VIII
							² 4 He
		⁵ B 10,81	⁶ C 12	⁷ N 14	⁸ O 15,99		
		¹³ Al 26,09	¹⁴ Si 28	¹⁵ P 30,97	¹⁶ S 32	Cl	Ar
²⁹ Cu 63,54		³¹ Ga 70,92	³² Ge 72,61	³³ As 74,92	³⁴ Se 78,95	³⁵ Br 79,90	

Bild 4.4: Halbleiter-Materialien

Stoffe, in denen Ladungsträger praktisch nicht frei beweglich sind, heißen Nichtleiter oder Isolatoren. Stoffe, in denen ein Teil der Ladungsträger sehr gut frei beweglich ist, heißen Leiter (**Bild 4.5**).

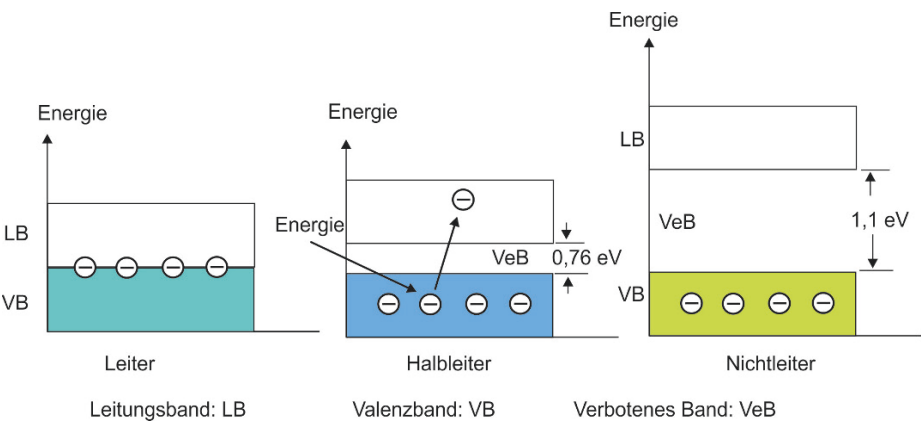


Bild 4.5: Bänder, elektrische Leitfähigkeit

Metalle sind gute elektrische Leiter z.B. Kupfer, Silber und Gold. In einem Leiter befinden sich ca. 10^{23} freie Elektronen/ cm^3 .

Halbleiter, wie z.B. Germanium und Silizium, besitzen fast keine freien Ladungsträger. Durch Dotieren mit Fremdatomen (höherwertig n-Material oder niederwertig p-Material) kann man die Leitfähigkeit erhöhen.

Nichtleiter (Isolatoren) sind Stoffe, in denen Ladungsträger nicht frei beweglich sind, z.B. Porzellan, Seide, Hartgummi, Papier, Baumwolle, Glas, bestimmte Keramiken und Quarz.

Dotierte Halbleiter:

Die äußere Elektronenschale bei Halbleitern ist nicht vollbesetzt. Auf der äußeren Schale sind vier Elektronen (**Bilder 4.6**). Im Kristallverbund gehen diese Elektronen Bindungen mit den Nachbaratomen ein, z.B. Phosphor so dass eine voll besetzte Schale entsteht.

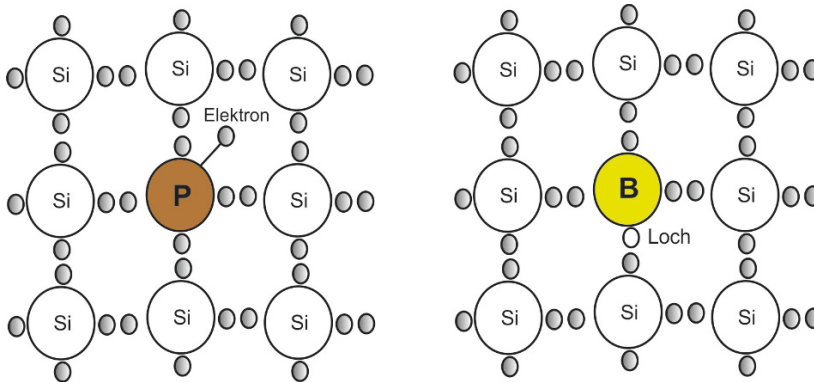


Bild 4.6: Beispiel für n- und p-Halbleiter

n-Halbleiter: Beim Dotieren werden in das Kristallgitter des vierwertigen Siliziums (4 Elektronen auf der äußersten Elektronenhülle) fünfwertige Atome (5 Elektronen auf der äußersten Elektronenhülle), z.B. Arsen (As), Antimon (Sb) oder Phosphor (P) eingebaut. Sie wirken als Elektronendonatoren (Elektronenspender). Dadurch entstehen praktisch ungebundene, bewegliche Elektronen. Die freien Ladungsträger sind Elektronen. Das überschüssige Donatorelektron ist nicht sehr fest an sein Atom (hier P) gebunden und kann mit sehr geringer Energiezufuhr (z.B. thermische Energie bei Zimmertemperatur) in das Leitungsband gehoben werden.

p-Halbleiter:

In das Kristallgitter des vierwertigen Siliziums werden beim p-Halbleiter dreiwertige Atome eingebaut, z.B. Gallium (Ga), Indium (In), Aluminium (Al) oder Bor (B). Sie dienen als Elektronenakzeptoren (fangen Elektronen ein). Dadurch entsteht eine Elektronen-Fehlstelle (Loch, Defektelektron). Dieses wirkt wie ein positiver freier Ladungsträger. Geringe thermische Energie genügt, um ein Elektron aus dem Valenzband des Siliziums zu lösen und die Elektronenfehlstelle des B-Atoms, d.h. das Akzeptorniveau zu besetzen, wobei ein Loch (Defektelektron) im Valenzband des Siliziums entsteht. Dieses Loch wirkt wie ein positiver beweglicher Ladungsträger.

4.3 Elektrischer Strom

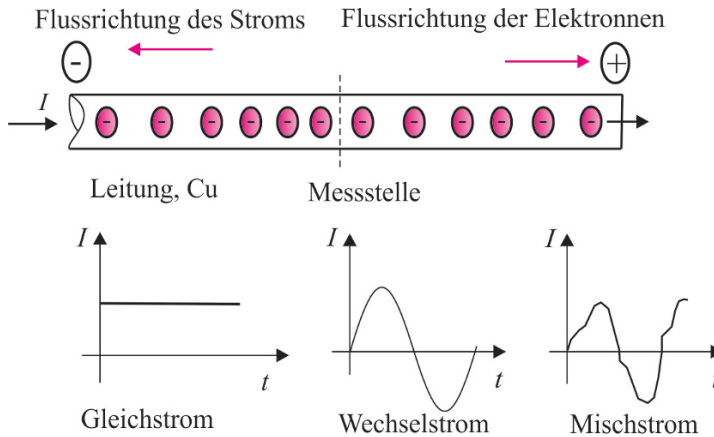
Wir haben Elektronen und Protonen und damit negative und positive Ladungsträger kennengelernt.

Was ist der elektrische Strom?

Bewegliche Ladungsträger in Leitern sind Elektronen und Ionen. Die frei beweglichen Ladungsträger eines Leiters befinden sich bei Temperaturen oberhalb des absoluten Nullpunkts in dauernder ungeordneter Bewegung. Es ist deshalb zunächst kein gerichteter Ladungstransport festzustellen. Bei Leitern kann man erreichen, dass alle beweglichen Ladungsträger positiver Ladung in die eine, negativer Ladung in die entgegengesetzte Richtung wandern. Dieses gerichtete Wandern bezeichnet man als elektrische Strömung bzw. als elektrischen Strom (**Bild 4.7**). Die transportierte Ladung Q ist proportional zum Strom I und zur Zeitdauer t des Stromflusses. Mit den Basiseinheiten A für den Strom und s für die Zeit ergibt sich für die Definitionsgröße Ladung die Definitionseinheit As. Zur Abkürzung verwendet man anstelle der Einheit As auch Coulomb.

Allgemeine Definition der elektrischen Stromstärke ist:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (4.1)$$

**Bild 4.7:** Stromarten

Beim Gleichstrom (zeitlich konstant) erhält man:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (4.2)$$

Beim Wechselstrom haben wir zeitlich veränderliche Größen:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (4.3)$$

Die Einheit der elektrischen Stromstärke ist dann

$$[I] = \text{A (Ampere)}$$

Ursache des elektrischen Stroms ist eine gerichtete Kraftwirkung auf die Ladungsträger. Elektrischer Strom ist ein Ladungstransport.

Beispiele für elektrische Stromstärken sind in (**Tabelle 4.1**) aufgeführt:

Woher weiß die Ladung in welche Richtung sie fließen muss? Die Definition oder die Vereinbarung lautet:

Die technische Stromrichtung ist gleich der Wanderungsrichtung der positiven Ladungsträger und der Wanderungsrichtung der negativen Ladungsträger entgegengesetzt (**Bild 4.8**).

Tabelle 4.1: Stromstärken

Verbraucher, Ereignis	Stromstärke
Taschenrechner	100 μA
E-Herd	8 A
Waschmaschine	9 A
Motor	20 A
Transformator	900 A
Blitz	100 kA

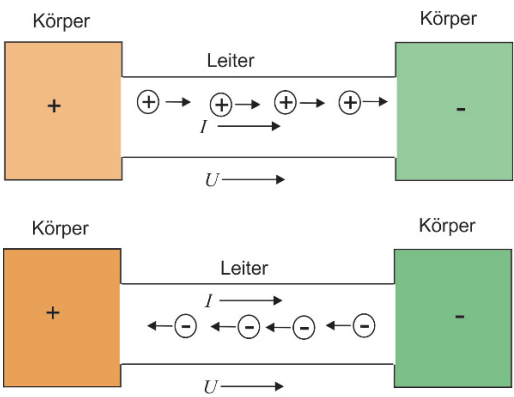


Bild 4.8: Technische Stromrichtung

4.4 Wirkungen des elektrischen Stromes

Elektrischer Strom ist gefährlich! Welche Gefahren und Wirkungen gibt es für Lebewesen und Anlagen?

- 1. Magnetische Wirkung: Ein stromflossener Leiter erzeugt ein begleitendes Magnetfeld (Bild 4.9).
- 2. Thermische Wirkung: Strom erzeugt Wärme, weil elektrische Leistung umgesetzt wird. In einem Ohmschen Widerstand wird Strom in Wärme umgesetzt.

$$W = I^2 \cdot R \cdot t \tag{4.4}$$

Die aufgenommene Leistung wird im Widerstand (z.B. Herd) in Wärme umgesetzt.

$$P = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R} \tag{4.5}$$

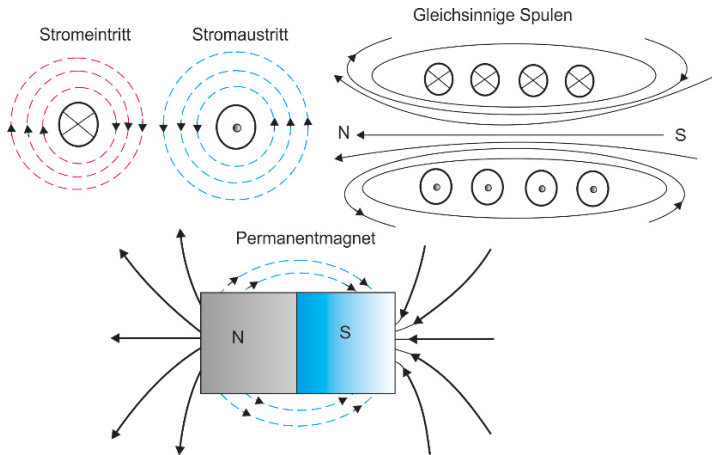


Bild 4.9: Magnetfelder

3. Chemische Wirkung: In Flüssigkeiten ruft Strom chemische Veränderungen hervor. Lösungen von Salzen, Säuren und Basen nennt man Elektrolyte. Sie haben eine gute Leitfähigkeit. Der Vorgang heißt Elektrolyse.
4. Optische Wirkung: In Gasen kann Strom Leuchterscheinungen erzeugen.
5. Biologische Wirkung: Ionenstrom transportiert Signale in biologischen Systemen. (Stromschlag!)

Für den menschlichen Körper ist die Stärke des Stroms maßgebend. Dabei kommt es auf die Spannung und Einwirkdauer an. Jeder Arm und jedes Bein hat mindestens den Widerstand von 500 Ohm. Der Widerstandsbereich des Körpers liegt zwischen 1000 Ohm und 3000 Ohm. Wenn man annimmt, dass der Körperwiderstand 1000 Ohm beträgt und die maximal mögliche Berührungsspannung 50 Volt anliegt dann fließt ein Strom von 50 mA.

Mit der Spannung an der Steckdose erhält man $\frac{230 \text{ V}}{1000 \Omega} = 230 \text{ mA}$. Dieser Strom führt zum Tod. Für die Wirkungen eines Wechselstroms nach IEC 479 zwischen 15 Hz und 100 Hz wurden vier gefährliche Bereiche angegeben (**Bild 11.16**). Bei höherfrequenten Strömen ist die Gefahr geringer, da die Ströme durch die Stromverdrängung an der Oberfläche des Körpers fließen.

4.5 Beispiele: Stromstärke

4.5.1 Beispiel: Berechnung der Stromstärke

Durch einen Cu-Leiter fließt je Sekunde eine Ladung von 4,4 mC. Wie groß ist die Stromstärke?

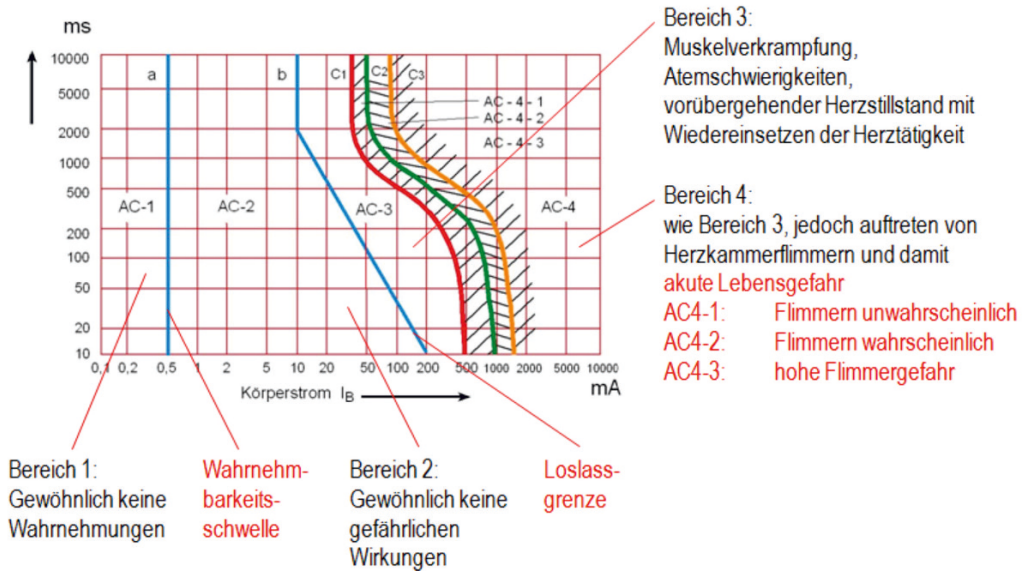


Bild 4.10: Wirkungsbereiche von Körperströmen beim Wechselstrom [13]

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{4,4 \text{ mC}}{1 \text{ s}} = 4,4 \text{ mA}$$

4.5.2 Beispiel: Berechnung der Ladung

Durch einen Cu-Leiter werden innerhalb von 2 s $1,87 \cdot 10^{19}$ Elektronen bewegt. Wie groß ist die Ladung und die Stromstärke?

Ladung:

$$Q_e = n \cdot 1,87 \cdot 10^{19} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 2,9996 \text{ C} \approx 3 \text{ As}$$

Stromstärke:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{3 \text{ As}}{2 \text{ s}} = 1,5 \text{ A}$$

4.6 Stromdichte

Die Strombelastbarkeit von Kabeln ist in vielen Tabellen der DIN-VDE-Vorschriften zusammengefasst, die wir uns später anschauen wollen. Wenn durch einen zylindrischen Leiter mit der Querschnittsfläche A der Strom I fließt, ist die Stromdichte S in diesem Leiter proportional zu I und umgekehrt proportional zu A (Bild 4.11).

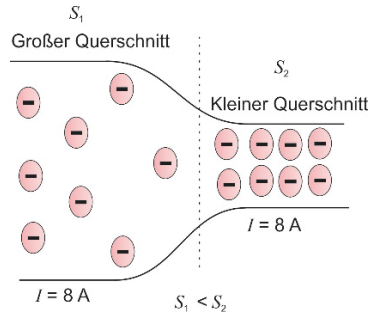


Bild 4.11: Stromdichte

$$S = \frac{I}{A} \quad (4.6)$$

Ihre Einheit ist $[S] = \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$ oder in der Praxis $[S] = \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$

Die Stromdichte ist ein Maß für die thermische Belastbarkeit von Kabeln und Leitungen.

4.7 Beispiele: Stromdichte

4.7.1 Beispiel: Glühlampe

Eine 58-W-Leuchtstofflampe ist an einem Leitungsquerschnitt $1,5 \text{ mm}^2$ angeschlossen und wird von einem Strom $0,252 \text{ A}$ durchflossen. Die Spannung beträgt 230 V . Berechnen Sie die Stromdichte des Leiters.

$$J = \frac{I}{A} = \frac{0,252 \text{ A}}{1,5 \text{ mm}^2} = 0,168 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

4.7.2 Beispiel: Fundamenterder

In einem Fundamenterder mit Abmessungen $30 \text{ mm} \times 3,5 \text{ mm}$ fließt ein Fehlerstrom von 350 A . Berechnen Sie die Stromdichte des Erders.

$$J = \frac{I}{A} = \frac{350 \text{ A}}{105 \text{ mm}^2} = 3,33 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

4.8 Elektrische Spannung

In einem Leiter sind die Elektronen frei und haben keine Richtung. Die Strömung dieser Ladungen erfolgt durch eine Spannung, der sogenannten Spannungsquelle, als treibende Kraft. Eine geordnete Bewegung und die Trennung der positiven und negativen Ladungen ist nur durch die Spannungsquelle möglich.

Wenn ein Ladungsträger von einem Punkt A zu einem Punkt B gebracht oder verschoben werden soll, dann braucht man eine zugeführte Arbeit W_{zu} . So wird in diesem Raum ein elektrisches Feld aufgebaut. Das äußere Merkmal ist dabei die Entstehung einer elektrischen Spannung U (**Bild 4.12**).

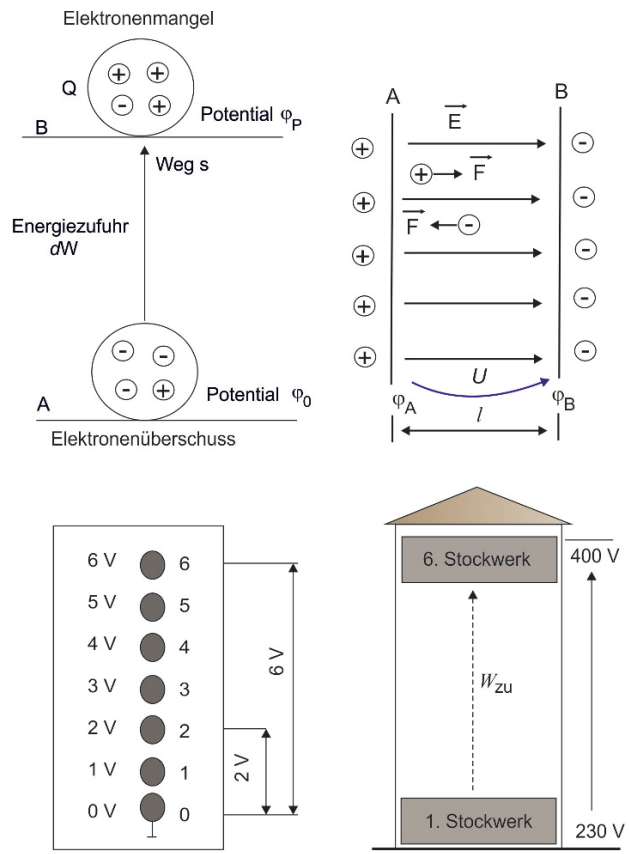


Bild 4.12: Darstellung der Spannung

Die Spannung zwischen A und B ist:

$$U_{AB} = \frac{W_A - W_B}{Q} = \frac{W_{AB}}{Q} \tag{4.7}$$

Die Kraft, die auf die Ladung wirkt:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \Rightarrow \vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} \quad (4.8)$$

Elektrische Spannung zwischen den Platten im homogenen Feld:

$$U = E \cdot l = \frac{F \cdot l}{Q} \quad (4.9)$$

Spannung ist demnach eine Definitionsgröße. Ihre Einheit ergibt sich mit:

$$\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3} = \text{W}(\text{Watt}) = [P]$$

und $U = \frac{P}{I}$ ergibt sich $[U] = \frac{W}{A}$

$$\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3 \text{ A}} = \frac{\text{W}}{\text{A}} = \text{V}(\text{Volt})$$

oder

$$[U] = \frac{1 \text{ Ws}}{1 \text{ As}} = \frac{1 \text{ W}}{1 \text{ A}} = 1 \text{ V}$$

Elektrische Spannung kann man z.B.

- durch Reiben eines Plastikstabes an einem Wolltuch,
- durch elektromagnetische Induktion,
- durch die Kombination von Stoffen mit speziellen chemischen Eigenschaften oder
- durch den lichtelektrischen Effekt nachvollziehen.

Merksatz: Wenn ein Strom durch einen Widerstand fließt, dann entsteht ein Spannungsfall entlang der Leitung. In elektrischen Anlagen darf dieser Spannungsfall insgesamt ∓ 10 nicht überschreiten. Spannung und Spannungsfall haben also dasselbe Symbol, die selbe Einheit und werden mit denselben Messgeräten gemessen.

Spannung entsteht durch Ladungstrennung. Ausgleichsbestreben dieser Ladungen ist die elektrische Spannung. Spannung ist die zur Trennung aufgewendete Arbeit pro Ladung.

Beispiele für die elektrische Spannungen zeigt **Tabelle 4.2**:

Tabelle 4.2: Spannungen

Verbraucher, Ereignis	Spannung
Primärzelle	1,5 V
Haushalt (Wechselstromnetz)	230 V
Motor (Drehstromnetz)	400 V
Freileitungen	20 kV, 110 kV, 220 kV, 380 kV
Blitz	200 kV

4.9 Beispiele: Elektrische Spannung

4.9.1 Beispiel: Arbeit

Eine Ladung von $30 \mu\text{C}$ wird mit der Kraft 6 mN über eine Strecke von 60 mm transportiert. Wie groß ist die Arbeit?

$$W = F \cdot s = 6 \text{ mN} \cdot 0,06 \text{ m} = 0,36 \text{ mNm} = 0,36 \text{ mJ}$$

4.9.2 Beispiel: Spannung

Wie groß ist die Spannung?

$$U = \frac{W}{Q} = \frac{0,36 \text{ mJ}}{0,03 \text{ mC}} = 12 \text{ V}$$

4.10 Elektrischer Widerstand

Wenn ein Verbraucher an eine Spannungsquelle über einen Kupferleiter angeschlossen und der Schalter betätigt wird, dann beginnt ein Strom zu fließen. Dabei stoßen sich die Elektronen mit den Atomen des Kupferleiters und werden gebremst. Dabei entsteht Wärme, die abgeführt werden muss. Die Strömung des Stromes ist direkt proportional dem Querschnitt des Leiters. Der dargestellte Stromkreis wird elektrisch durch seinen Strom I und seine Spannung U charakterisiert (**Bild 4.13**).

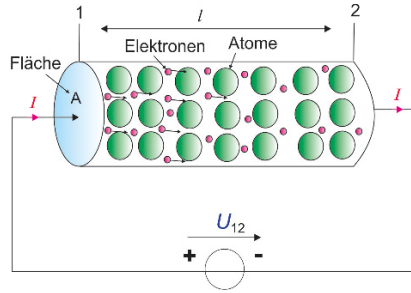


Bild 4.13: Elektrischer Widerstand

Die technische Stromflussrichtung ist von $+$ nach $-$ im äußeren Stromkreis (außerhalb der Spannungsquelle). Die Elektronen fließen von $-$ nach $+$.

Ein Stromkreis besteht aus folgenden Komponenten:

- Spannungsquelle
- Verbindungsleitungen, evtl. Schaltelemente und Messgeräte
- Verbraucher

Zum Begriff **Widerstand**: Der Begriff Widerstand wird in der Elektrotechnik mit zwei unterschiedlichen Bedeutungen benutzt:

- Widerstand ist eine in Ω gemessene physikalische Größe eines Leiters.
- Mit Widerstand bezeichnet man einen Leiter, bei dessen technischer Anwendung es vorwiegend auf die physikalische Größe Widerstand ankommt.

Experimente zeigen, dass

$$I \sim U$$

und

$$S \sim E$$

ist.

Daraus erhält man mit der spezifischen Leitfähigkeit des Materials:

$$S = \kappa \cdot E \quad (4.10)$$

Wenn man die Stromdichte und die elektrische Feldstärke einsetzt, erhält man

$$\frac{I}{A} = \kappa \cdot \frac{U}{l} \quad (4.11)$$

$$U = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{l}{A} \cdot I = R \cdot I \quad (4.12)$$

R bezeichnet man als Widerstand des Leiters. Der Widerstand ist eine Definitionsgröße mit der Definitionseinheit

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = \frac{l}{\kappa \cdot A} \quad (4.13)$$

Die Formel zeigt, dass der Widerstand direkt proportional zur Leitungslänge und umgekehrt proportional zum Querschnitt des Leiters ist.

Die Einheit des Widerstandes ist:

$$[R] = \frac{1 \text{ m}}{\frac{1 \text{ m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \cdot \text{mm}^2} = \Omega$$

Mit der Definitionseinheit erhält man aus

$$R = \frac{U}{I}$$

was

$$[R] = \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3 \text{ A}^2} = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \Omega \text{ (Ohm)}$$

ergibt.

Der spezifischer Widerstand:

$$\rho = \frac{1}{\kappa}$$

Seine Einheit ist:

$$\rho = \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Wie gut ein Leiter den Strom leiten kann, entscheidet der spezifische Widerstand eines Leiters. Den elektrischen Leitwert einer Leitung definiert man mit

$$G = \frac{1}{R} \quad (4.14)$$

Die Einheit vom elektrischen Leitwert ist $[G] = 1 \text{ Siemens}$.

Bei zunehmender Temperatur steigt der Widerstand des Leiters mit

$$R_T = R_{20} \cdot [1 + \alpha_{20}(\vartheta_2 - \vartheta_1)] \quad (4.15)$$

α_{20} beträgt bei Kupfer $3,9 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$.

4.11 Beispiele: Elektrischer Widerstand

4.11.1 Beispiel: Stromkreiswiderstand

In einem Stromkreis fließt ein Strom von 5 A an der Spannung 230 V. Berechnen Sie den Widerstand des Leiters.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{230 \text{ V}}{5 \text{ A}} = 46 \Omega$$

4.11.2 Beispiel: Leitwert

Die Heizspirale eines Heizlüfters beträgt 40Ω . Berechnen Sie den Leitwert G des Widerstandes.

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{40 \Omega} = 25 \text{ mS}$$

4.11.3 Beispiel: Widerstand eines Leiters

Eine 15 m lange Cu-Leitung mit einem Querschnitt von $2,5 \text{ mm}^2$ wird mit einem Strom von 12 A belastet. Berechnen Sie den Widerstand und den Spannungsfall der Leitung.

$$R = \frac{l}{\kappa \cdot A} = \frac{10 \text{ m}}{56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot 2,5 \text{ mm}^2}} = 107 \text{ m}\Omega$$

Spannungsfall der Leitung:

$$U = R \cdot I = 107 \text{ m}\Omega \cdot 12 \text{ A} = 1,29 \text{ V}$$

4.12 Strom- und Spannungszählpfeile

Ein Stromkreis besteht aus einer Quelle, einer Leitung und einem Verbraucher. Die Richtung der Spannung und des Stromes werden mit Zählpfeilen angegeben werden. Das ist nur mit einem Strom- und Spannungszählpfeil möglich (**Bild 4.14**).

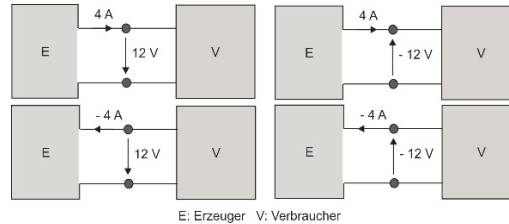


Bild 4.14: Zählpfeile

4.13 Erzeuger- und Verbraucherzählpfeile

Spannungen und Ströme werden in Schaltplänen durch Zählpfeile dargestellt (**Bild 4.15**). Beim Erzeuger zeigen die Spannungs- und Strompfeile in die entgegengesetzte Richtung (Erzeugerpfeilsystem, $P < 0$), beim Verbraucher in die gleiche Richtung (Verbraucherpfeilsystem, $P > 0$).

In letzter Zeit wird der Begriff **Tor** = **port** für die Klemmen verwendet. Die Begriffe **Eintor** (oneport) und Zweipol sind gleichbedeutend.

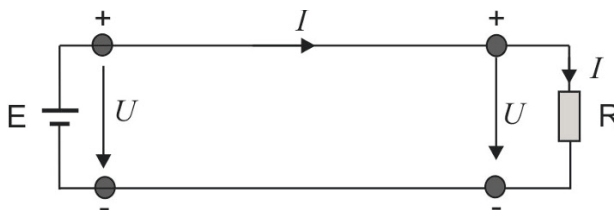


Bild 4.15: Zählpfeile

4.14 Elektrische Leistung, Arbeit und Energie

Die drei Begriffe **Leistung**, **Arbeit** und **Energie** werden öfters durcheinander gebraucht. Im stromdurchflossenen Kabel entsteht ein Widerstand, der die Wärme hervorruft. Das bedeutet, dass dort eine Arbeit (Stromarbeit) verrichtet wird. Das

Produkt aus Spannungsfall über dem Widerstand und Stromstärke durch den Widerstand ist die Leistung P des Widerstands. Die Arbeit, die in einer bestimmten Zeit verrichtet wird, nennt man Leistung. Dabei wird der Energiezustand eines Körpers verändert.

$$P = U \cdot I \quad (4.16)$$

Die Einheit der elektrischen Leistung ist Watt.

$$[P] = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = \text{W}$$

Die elektrische Arbeit W ist das Maß für die bei der Durchströmung entstandene Wärmemenge. Sie entspricht der Leistung, die über eine bestimmte Zeit erbracht wird.

$$W = P \cdot t \quad (4.17)$$

Die Einheit der elektrischen Arbeit ist die Wattsekunde

$$[W] = 1 \text{ W} \cdot \text{s} = \text{Ws}$$

und gleichwertig mit dem Joule (J) und dem Nm. Ganz allgemein gesagt: Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten. Beide haben das gleiche Formelzeichen und die gleiche Einheit. Dabei wird zwischen einer potentiellen und kinetischen Energie unterschieden. Mit Spannung, Stromstärke, Widerstand, Leistung und Arbeit können die wesentlichen Parameter des elektrischen Systems bestimmt werden.

4.15 Wirkungsgrad

Die von einem elektrischen Verbraucher aufgenommene Leistung (zugeführte Leistung) P_{zu} lässt sich aufspalten in einen genutzten Teil P_{ab} und in einen nicht nutzbaren Anteil P_v , der meist als Wärmeleistung verloren geht (**Bild 4.16**).

Der Wirkungsgrad wird als das Verhältnis von abgegebener Leistung zu zugeführter Leistung definiert und wird auch in % angegeben.

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \cdot 100\% \quad (4.18)$$

Beispiele für die Leistungen sind in **Tabelle 4.3** zusammengestellt.

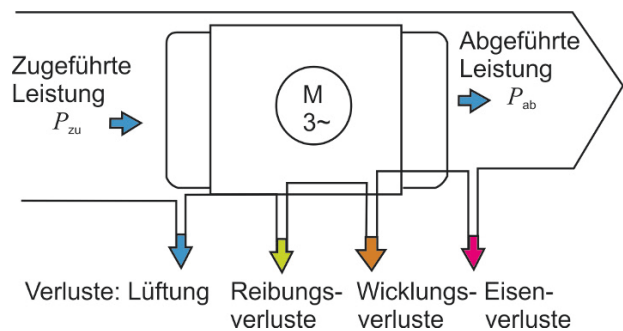


Bild 4.16: Wirkungsgrad eines Motors

Tabelle 4.3: Leistungen

Verbraucher	Leistung
Atomkraftwerk	1200 MW
Haushalt	6 kW
Drehstrom-Motor	5,5 kW
Leuchtstofflampe	58 W
Steckdose (einfach)	200 W
Kühlschrank	150 W
Fernseher	100 W

4.16 Beispiele: Elektrische Leistung

4.16.1 Beispiel: Pumpe

Eine Pumpe fördert 200 l Wasser in der Minute 50 m hoch. Mit welcher Leistung muss die Pumpe angetrieben werden?

$$P = \frac{F \cdot s}{t} = \frac{\rho \cdot V \cdot g \cdot s}{t} = \frac{1\text{kg} \cdot 200 \text{ dm}^3 \cdot 9,81 \text{ m} \cdot 50 \text{ m}}{\text{dm}^3 \cdot \text{s}^2 \cdot 60 \text{ s}} = 1,635 \text{ kW}$$

4.16.2 Beispiel: Hebebühne

Ein Auto von 1,5 t wird in 3 s auf eine Höhe von 1,5 m gebracht. Berechnen Sie die Leistung vom Motor.

$$P = \frac{F \cdot s}{t} = \frac{1500 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m}}{\text{s}^2 \cdot 3 \text{ s}} = 7,35 \text{ kW}$$

4.16.3 Beispiel: Lampen parallel

Eine Halogenglühlampe ($\cos\varphi = 1$) mit dem Betriebsstrom 0,5 A ist an eine Spannung von 230 V angeschlossen. Berechnen Sie die Leistung.

$$P = U \cdot I = 230 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ A} = 115 \text{ W}$$

Berechnen Sie den Betriebsstrom, wenn eine weitere, gleiche Lampe parallel zur ersten Lampe geschaltet wird.

Die Gesamtleistung beträgt:

$$P_G = 115 \text{ W} + 115 \text{ W} = 230 \text{ W}$$

Der Gesamtstrom beträgt:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{230 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 1 \text{ A}$$

4.16.4 Beispiel: Lampen in Reihe geschaltet

Berechnen Sie den Nutzwiderstand, wenn eine Lampe bei 0,5 A und 230 V konstant betrieben wird.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{230 \text{ V}}{0,5 \text{ A}} = 460 \Omega$$

Wenn zwei Lampen in Reihe geschaltet werden:

$$R_G = 460 \Omega + 460 \Omega = 920 \Omega$$

Der Gesamtstrom beträgt dann:

$$I_G = \frac{U}{R} = \frac{230 \text{ V}}{920 \Omega} = 0,250 \text{ A}$$

und die Leistung:

$$P = U \cdot I = 230 \text{ V} \cdot 0,250 \text{ A} = 57,5 \text{ W}$$

Wie man sieht, bekommt man weniger Leistung und dementsprechend weniger Licht, wenn die Lampen in Reihe geschaltet werden.

4.17 Beispiele: Strom, Spannung und Widerstand

4.17.1 Beispiel: Widerstandswerte

Ein Kupferdraht mit einer Querschnittsfläche von $1,5 \text{ mm}^2$ hat eine Länge von 10 m . Der spezifische Widerstand von Kupfer beträgt $0,01786 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$. Es sollen der spezifische Leitwert κ von Kupfer sowie der ohmsche Widerstand und der Leitwert des beschriebenen Kupferdrahtes berechnet werden.

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0,01786 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}} = 56 \frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2}$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = 0,01786 \Omega \text{ mm}^2/\text{m} \cdot \frac{10 \text{ m}}{1,5 \text{ mm}^2} = 119 \text{ m}\Omega$$

$$G = \frac{1}{R} = 8,40 \text{ S}$$

4.17.2 Beispiel: Glühlampe

Von einer Glühlampe ist nur bekannt, dass bei einer angelegten Spannung von 12 V ein konstanter Gleichstrom der Stärke 500 mA fließt.

- a) Wie groß ist die Leistung der Glühlampe?
- b) Welche elektrische Energie nimmt die Glühlampe in einer Stunde auf?

a) Leistung der Glühlampe

$$P = U \cdot I = 12 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ A} = 6 \text{ W}$$

b) elektrische Energie der Lampe

$$W = P \cdot t = 6 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 21600 \text{ Ws} = 21600 \text{ J} = 21,6 \text{ kJ} = 0,006 \text{ kWh}$$

4.18 Analogiebetrachtungen

Die Verhältnisse in der Heizungstechnik und der Elektrotechnik kann man vergleichen, in dem man den Flüssigkeitskreis und den Stromkreis zeichnet (**Bild 4.17**).

Die Elemente beim Flüssigkeitskreis und Stromkreis sind in **Tabelle 4.4** angegeben.

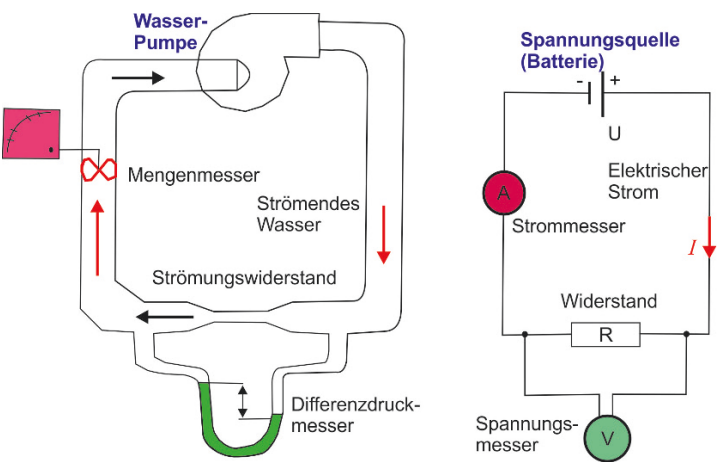


Bild 4.17: Flüssigkeitskreis-Stromkreis-Model

Tabelle 4.4: Flüssigkeitskreis-Stromkreis-Model

Flüssigkeitskreis	Stromkreis
Pumpe	Spannungsquelle
Rohrleitungen	Stromleitungen
Strömungswiderstand	Elektrischer Widerstand
Mengenmesser	Strommesser
Druckdifferenzmesser	Spannungsmesser
Volumenstrom	Elektrischer Strom



5 Grundgesetze der Elektrotechnik

In diesem Kapitel werden folgende Themen behandelt [1], [4]:

1. das Ohmsche Gesetz,
2. die Kirchhoffschen Gesetze und
3. die Berechnung von Schaltkreisen.

Um in einem elektrischen Stromkreis das Zusammenwirken von Spannung, Strom, Widerstand und Leistung beschreiben und berechnen zu können, braucht man Gesetze, mit denen eine Netzwerkanalyse übersichtlich und einfach durchgeführt werden kann.

5.1 Das Ohmsche Gesetz

In einem Stromkreis mit Ohmschen Widerständen sind Spannung und Strom linear voneinander abhängig. Variiert man die Spannung U , so stellt man fest, dass sich der Strom I proportional zu U verändert (**Bild 5.1**).

Diese Proportionalität können wir durch die Gleichung ersetzen.

$$U \sim I \quad (5.1)$$

Die Proportionalitätskonstante zwischen Strom und Spannung nennt man Widerstand.

$$R = \frac{U}{I} \quad (5.2)$$

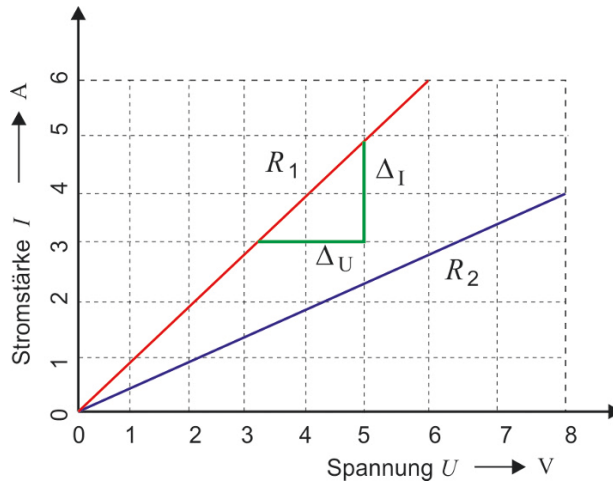


Bild 5.1: Strom-Spannungsdiagramm

Diese Beziehung bezeichnet man als **Ohmsches Gesetz**. Die Proportionalitätskonstante R bezeichnet man als elektrischen Widerstand, der im Allgemeinen konstant ist. Georg Simon Ohm (1789-1864) entdeckte 1826 den Zusammenhang zwischen den Materialeigenschaften eines elektrischen Leiters und dem Stromfluss durch diesen Leiter in Abhängigkeit von der elektrischen Spannung.

5.2 Die Kirchhoffschen Gesetze

Vier Begriffe sind hier von großer Bedeutung (**Bild 5.2**):

1. Netzwerk: Im Allgemeinen besteht eine Schaltung aus einer Anzahl von Elementen, die untereinander mit Leitungen verbunden sind. Diese Schaltung insgesamt bezeichnet man als Netzwerk.
2. Knoten: Die Verbindungspunkte zweier oder mehrerer Leitungen nennt man Knoten.
3. Zweig: Der zwischen zwei Knoten liegende Leitungszug heißt Zweig.
4. Masche: Jeder geschlossene Umlauf von einem Punkt des Netzwerkes auf einem beliebigen Weg zum Ausgangspunkt zurück heißt Masche.

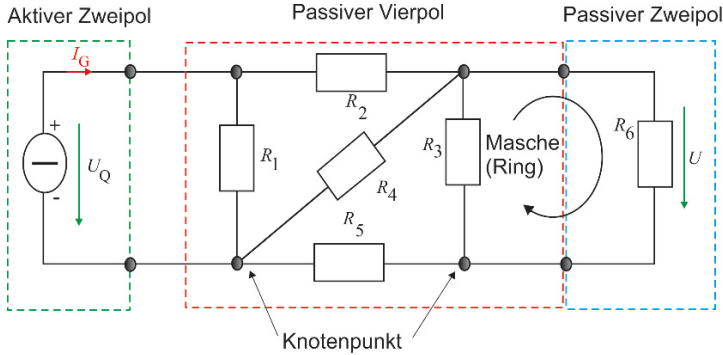


Bild 5.2: Kirchhoffsche Gesetze

5.2.1 Erster Kirchhoffscher Satz (Knotenregel)

In einem Knotenpunkt können keine Ladungen verschwinden und auch keine Ladungen neu entstehen. Deshalb ist die Summe aller zufließenden Ströme gleich der Summe aller abfließenden Ströme. In einem Knoten ist die Summe aller Ströme gleich null ($\sum I = 0$), wobei Ströme, die in den Knoten hineinfließen, positiv und Ströme, die aus dem Knoten herausfließen, negativ zu zählen sind (**Bild 5.3**). (Alternativ: Ströme, die in den Knoten hineinfließen, negativ zählen und die Ströme, die aus dem Knoten herausfließen, positiv zählen.)

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad (5.3)$$

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (5.4)$$

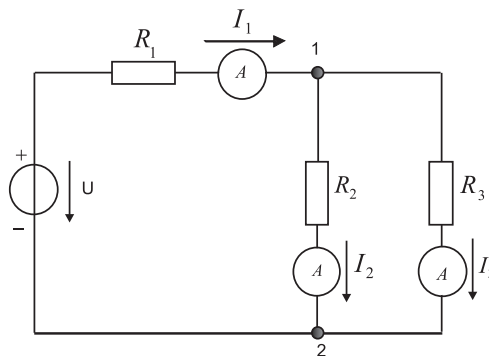


Bild 5.3: Knotenregel

In einem Stromknoten ist die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme $I_{\text{zu}} = I_{\text{ab}}$.

Aus dem 1. Kirchhoffschen Gesetz lässt sich die Stromteilerregel ableiten (**Bild 5.4**):

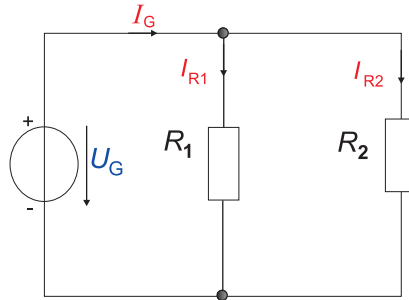


Bild 5.4: Stromteilerregel

$$I_{R1} = I_G \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.5)$$

$$I_{R2} = I_G \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (5.6)$$

$$R_G = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.7)$$

5.2.2 Beispiel zum 1. Kirchhoff'schen Satz

Schreiben Sie die Knotenregel für die Schaltung auf und berechnen Sie die Ströme.

Für den Knotenpunkt a gilt:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$I_2 = I_1 - I_3 = 2\text{A}$$

Für den Knotenpunkt b gilt:

$$I_2 + I_4 - I_6 = 0$$

$$I_4 = I_6 - I_2 = -1\text{A}$$

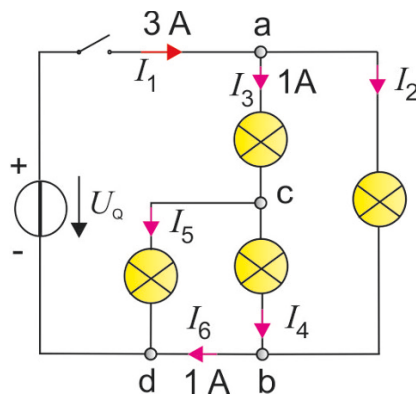


Bild 5.5: Knotenregel

Für den Knotenpunkt c gilt:

$$I_3 - I_4 - I_5 = 0 \text{ A}$$

$$I_5 = I_3 - I_4 = 2 \text{ A}$$

5.2.3 Zweiter Kirchhoffscher Satz (Maschenregel)

Der zweite Kirchhoffsche Satz besagt, dass in einer Masche die Summe aller Zweigspannungen gleich null ist, wobei Spannungen, deren Zählpfeile in Richtung des Maschenumlaufes zeigen, positiv gezählt, und die Spannungen, deren Zählpfeile entgegen der Richtung des Maschenumlaufes zeigen, negativ gezählt werden (**Bild 5.6**).

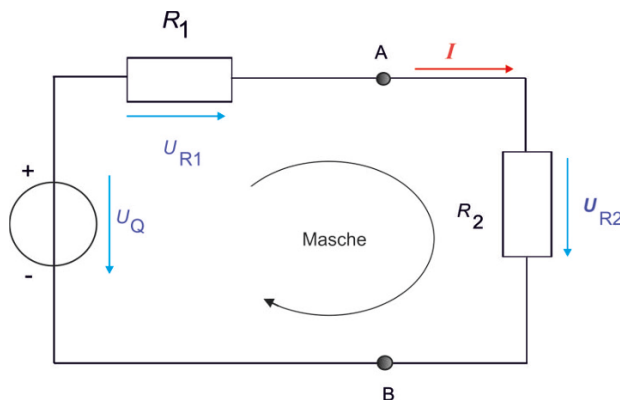


Bild 5.6: Maschenumlauf

Die Summe aller Spannungen in einer Masche ist gleich null ($\sum U = 0$).

$$U_{R1} + U_{R2} - U_Q = 0 \quad (5.8)$$

oder

$$U_Q = U_{R1} + U_{R2} \quad (5.9)$$

Aus dem 2. Kirchhoffschen Gesetz lässt sich die Spannungsteilerregel ableiten (**Bild 5.7**):

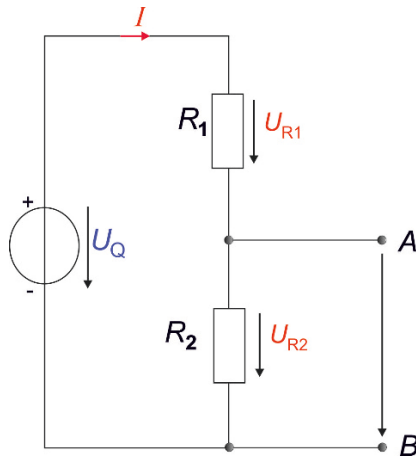


Bild 5.7: Spannungsteiler

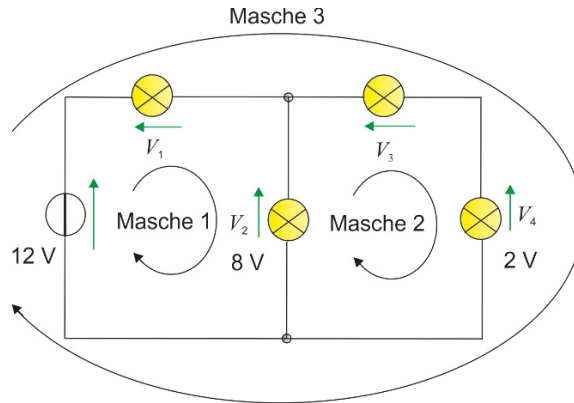
$$U_{R1} = U_Q \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (5.10)$$

$$U_{R2} = U_Q \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.11)$$

5.2.4 Beispiel zum 2. Kirchhoff'schen Satz

Schreiben Sie die Maschenregel für die Schaltung auf und berechnen Sie die Spannungen (**Bild 5.8**).

Für die Masche 1 gilt:

**Bild 5.8:** Maschenregel

$$U_1 - U_2 + U_Q = 0$$

$$U_Q = U_1 + U_2$$

$$U_1 = U_Q - U_2 = 4 \text{ V}$$

Für die Masche 2 gilt:

$$-U_2 + -U_3 - U_4 = 0$$

$$U_3 = U_2 - U_4 = 6 \text{ V}$$

Für die Masche 3 gilt:

$$U_Q = U_1 + U_3 + U_4$$

$$12 \text{ V} = 4 \text{ V} + 6 \text{ V} + 2 \text{ V} = 12 \text{ V}$$

6 Berechnung von Gleichstromkreisen

In diesem Kapitel werden folgende Themen behandelt:

1. die Schaltkreise,
2. die Stern- und Dreieckschaltungen und
3. die Ersatzquellen.

Jeder elektrischer Stromkreis besteht aus einem Erzeuger (Quelle), einem Verbraucher und einer Leitung, die den Erzeuger und den Verbraucher miteinander verbindet (**Bild 6.1**). Die Gleichströme sind zeitunabhängige Größen und haben große Buchstaben.

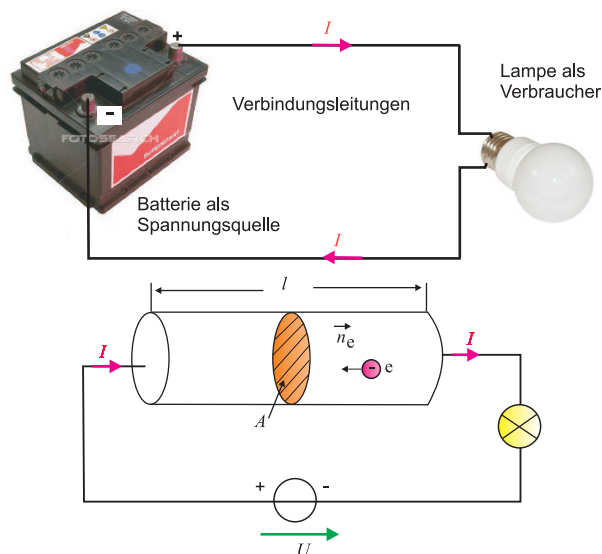


Bild 6.1: Stromkreis

Um elektrische Stromkreise berechnen zu können, sind Kenntnisse über die Bauelemente und ihre Gesetzmäßigkeiten unerlässlich. Diese Gesetze und Eigenschaften sind:

- 1. Ohmsches Gesetz,
- 2. Kirchhoffsche Gesetze,
- 3. Eigenschaften von Widerstand, Kondensator und Spule
- 4. und deren Anwendungen in elektrischen Netzwerken.

Für den Gleichstromkreis sind folgende Themen von großer Bedeutung:

- 1. Beherrschung der Grundgleichungen für einfache Bauelemente,
- 2. Anwendung der Kirchhoffschen Gesetze,
- 3. Berechnung von Reihen- und Parallelschaltungen von Widerständen,
- 4. Berechnung von Ersatzspannungsquellen und -Stromquellen,
- 5. Bestimmung von Kurzschluss- und Leerlaufdaten sowie Wirkungsgrad
- 6. Durchführung von Netzwerkberechnungen.

Die wichtigsten Bauelemente der Elektrotechnik sind in **Bild 6.2** wiedergegeben.

	Spannungsquelle	L^+	Gleichspannung
		L^-	
	Stromquelle	L_1	Außenleiter des Drehstromsystems
		L_2	
		L_3	
	Widerstand	N	Neutralleiter
	Spule	PE	Schutzleiter (nicht Protection Earth)
	Kondensator	U_n	Nennspannung
		U_0	Spannung gegen Erde

Bild 6.2: Bauelemente der Elektrotechnik

Um Gleichstromschaltungen berechnen zu können, werden reale Elemente durch Symbole ersetzt und Zählpfeile für Ströme und Spannungen eingetragen (**Bild 6.3**).

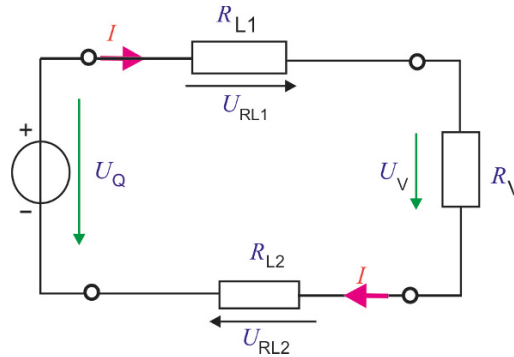


Bild 6.3: Gleichstromkreis und Ersatzschaltbild (V: Verbraucher)

6.1 Reihenschaltung von Widerständen

Alle Widerstände werden bei Reihenschaltung vom gleichen Strom durchflossen. Die Gesamtspannung ist an der Reihenschaltung gleich der Summe der Einzelspannungen, wobei die Zählpeile zu beachten sind (**Bild 6.4**). Bei den Einzelspannungen spricht man auch von Spannungsfällen.

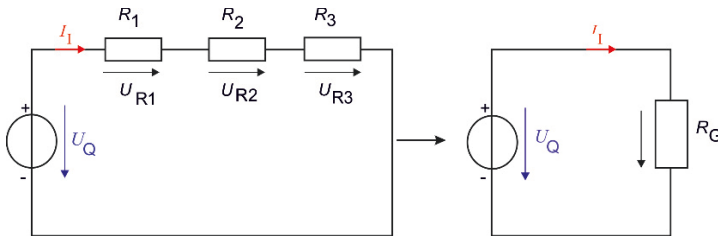


Bild 6.4: Reihenschaltung mehrerer Widerstände und Ersatzschaltbild

$$U_0 = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3 = I \cdot (R_1 + R_2 + R_3) = I \cdot R_G \quad (6.1)$$

$$R_G = \sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (6.2)$$

Der Gesamtwiderstand einer Reihenschaltung mehrerer Widerstände ist gleich der Summe der Einzelwiderstände.

6.1.1 Beispiel: Reihenschaltung der Leitungen

In **Bild 6.5** sind zwei in Reihe geschaltete Abgänge gezeigt. Dabei wurden die induktiven Widerstände vernachlässigt. Berechnen Sie den Gesamtwiderstand des Netzes.

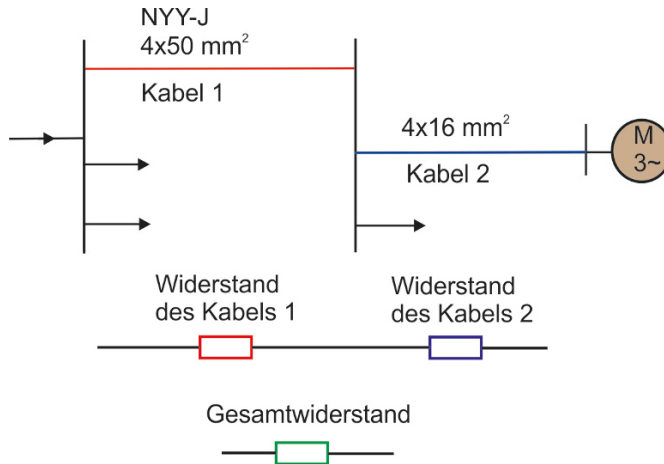


Bild 6.5: Beispiel zur Reihenschaltung aus der Praxis

Die Wirkwiderstände sind gegeben:

Das Kabel 1: $1,15 \Omega/\text{m}$,

Das Kabel 2: $0,387 \Omega/\text{m}$.

Der Gesamtwiderstand des Netzes beträgt bei 2°C :

$$R_G = R_1 + R_2 = 1,15 \Omega + 0,387 \Omega = 1,497 \Omega$$

6.1.2 Beispiel: Reihenschaltung

Berechnen Sie den Strom und den Widerstand der Lampen.

a)

Aus der Beziehung zwischen den elektrischen Größen wird der Strom für eine Lampe berechnet.

$$P = U \cdot I \Rightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{40 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 174 \text{ mA}$$

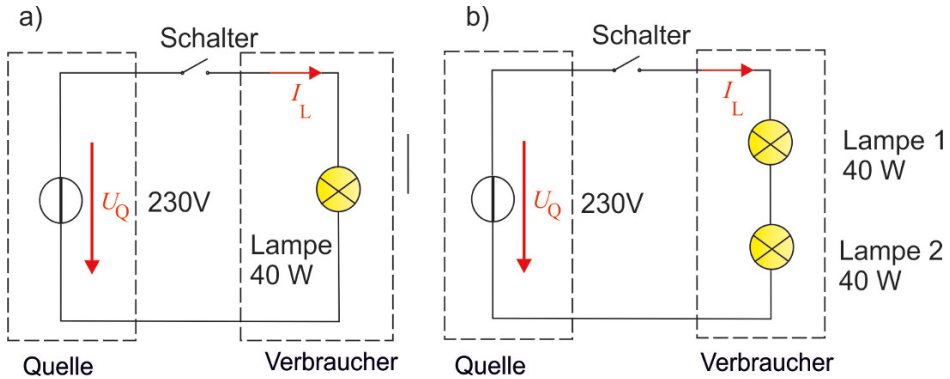


Bild 6.6: Beispiel zur Reihenschaltung aus der Praxis

Der Nutzwiderstand der Lampe beträgt:

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{40 \text{ W}}{(174 \text{ mA})^2} = 1321 \Omega$$

b)

Wir nehmen die Widerstände der Lampen und rechnen den Strom mit dem Gesamtwiderstand

$$I = \frac{U}{R_G} = \frac{230 \text{ V}}{2642 \Omega} = 87,06 \text{ mA}$$

Das Ergebnis zeigt, dass der Betriebsstrom mit der Erhöhung des Widerstandes halbiert wird d.h. absinkt (Lampen werden dunkler).

6.1.3 Beispiel: Berechnung der Quellenspannung

Beim Beispiel 2 werden in beiden Schaltungen die Lampen durch ihre Widerstände ersetzt. Der Betriebsstrom (Laststrom) beträgt jeweils 5 A. Die Quellenspannung der Schaltung kann mit dem Spannungsfall berechnet werden. Es gilt:

$$U_Q = U_1 + U_2$$

allgemein mit

$$U = I_L \cdot R$$

Die Ergebnisse sind in der Schaltung eingetragen.

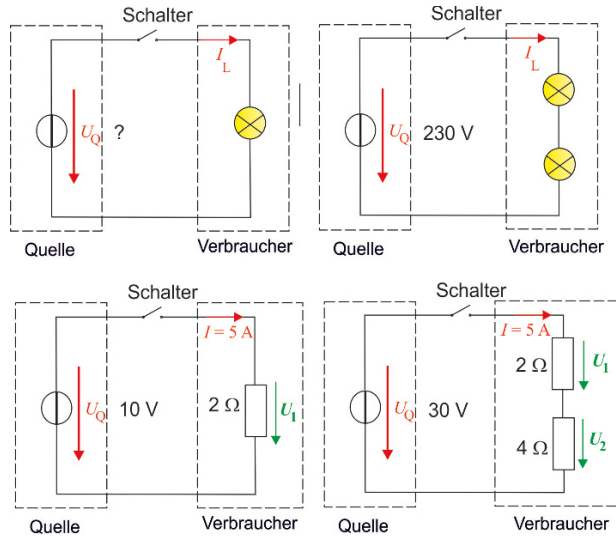


Bild 6.7: Beispiel zur Reihenschaltung aus der Praxis

6.2 Parallelschaltung von Widerständen

Der Gesamtstrom ist gleich der Summe der Einzelströme. An jedem Widerstand liegt die gleiche Spannung (**Bild 6.8**) an.

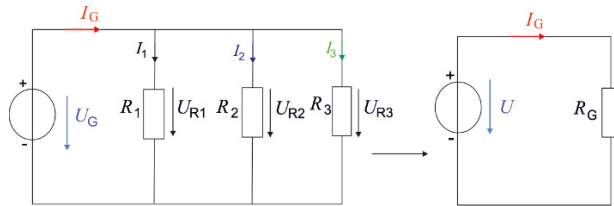


Bild 6.8: Parallelschaltung mehrerer Widerstände

Mit der 1. Kirchhoffschen Regel $\Sigma I = 0$ gilt:

$$\frac{U}{R_G} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = U \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \quad (6.3)$$

$$\frac{1}{R_G} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (6.4)$$

oder mit $G = \frac{1}{R}$ gilt:

$$G_g = G_1 + G_2 + G_3 \quad (6.5)$$

Der Gesamtwiderstand einer Parallelschaltung mehrerer Widerstände ist gleich der Summe der Reziprokwerte der Einzelwiderstände.

6.2.1 Beispiel: Parallelschaltung aus der Praxis

In **Bild 6.9** sind zwei parallelgeschaltete Abgänge gezeigt. Dabei wurden die induktiven Widerstände vernachlässigt.

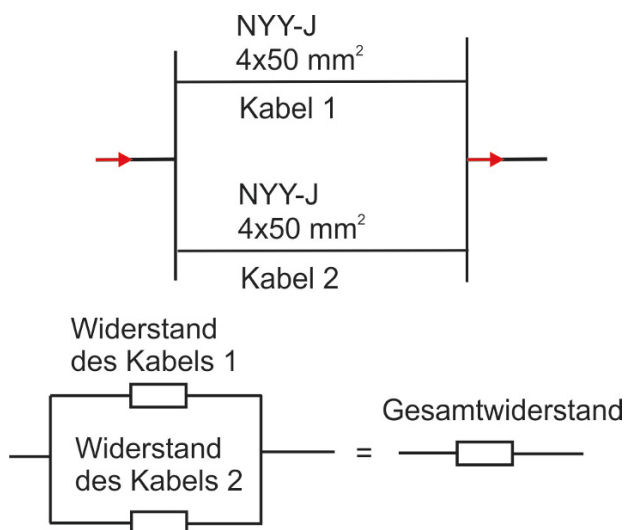


Bild 6.9: Beispiel zur Parallelschaltung aus der Praxis

6.2.2 Beispiel: Parallelschaltung

Berechnen Sie die Teilströme der Schaltung.

Der Strom im Abzweig 1 (Kabel 1) beträgt:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{230 \text{ V}}{20 \Omega} = 11,5 \text{ A}$$

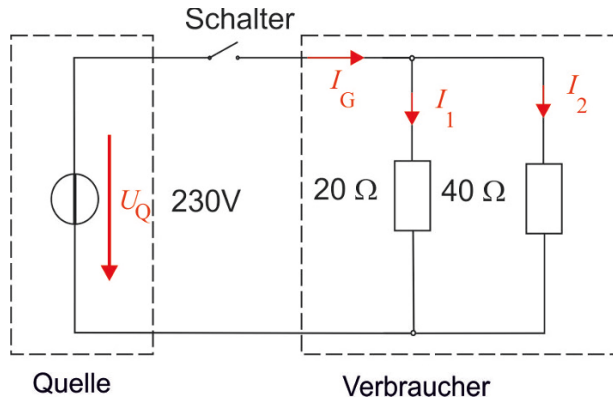


Bild 6.10: Beispiel zur Parallelschaltung aus der Praxis

Der Strom im Abzweig 2 (Kabel 2) beträgt:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{230\text{ V}}{40\ \Omega} = 5,75\text{ A}$$

Der Gesamtstrom beträgt:

$$I_G = I_1 + I_2 = 11,5\text{ A} + 5,75\text{ A} = 17,25\text{ A}$$

Wir berechnen jetzt den Strom über den Gesamtwiderstand

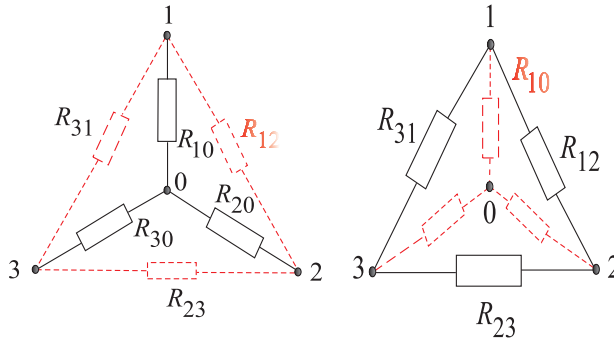
$$R_G = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{20\ \Omega \cdot 40\ \Omega}{20\ \Omega + 40\ \Omega} = 13,33\ \Omega$$

$$I_G = \frac{U}{R_G} = \frac{230\text{ V}}{13,33\ \Omega} = 17,25\text{ A}$$

Das Ergebnis ist bei beiden Verfahren identisch.

6.3 Stern-Dreieck-Umwandlung

Stromkreise sind oft keine Reihen- oder Parallelschaltungen. In diesem Fall müssen die Widerstände in eine Stern-Dreieckschaltung umgewandelt und vereinfacht werden (**Bild 6.11**).

**Bild 6.11:** Umwandlung von Widerständen

Umwandlung einer Sternschaltung in eine Dreieckschaltung:

$$R_{12} = R_{10} + R_{20} + \frac{R_{10} \cdot R_{20}}{R_{30}} \quad (6.6)$$

$$R_{23} = R_{30} + R_{20} + \frac{R_{30} \cdot R_{20}}{R_{10}} \quad (6.7)$$

$$R_{31} = R_{30} + R_{10} + \frac{R_{30} \cdot R_{10}}{R_{20}} \quad (6.8)$$

Umwandlung einer Dreieckschaltung in eine Sternschaltung:

$$R_{10} = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad (6.9)$$

$$R_{20} = \frac{R_{23} \cdot R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad (6.10)$$

$$R_{30} = \frac{R_{23} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad (6.11)$$

6.4 Wheatstonesche Brückenschaltung

Die Schaltung besteht aus vier Widerständen, von denen je zwei in Reihenschaltung parallel an einer Spannungsquelle angeschlossen sind. Sind von einer abgeglichenen Brückenschaltung drei Widerstände bekannt, so kann der unbekannte

Widerstand R_x bestimmt werden. Die Schaltung ist abgeglichen, wenn die Spannung $U_{AB} = 0$ ist und das Widerstandsverhältnis gleich ist. R_x wird anstelle eines Widerstandes angeschlossen (**Bild 6.12**).

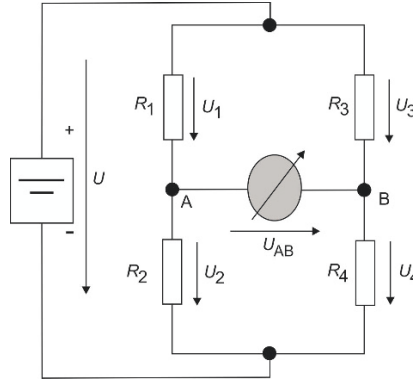


Bild 6.12: Brückenschaltung

Es gilt:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (6.12)$$

Mit dem unbekannten Widerstand erhält man:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_x} \Rightarrow R_x = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (6.13)$$

6.5 Thevenin-Theorem (Lineare Spannungsquelle)

In der Praxis kommt es öfters vor, dass die Verbraucher in einem Stromkreis veränderlich sind und die Quelle feststeht. Jedesmal muss der Stromkreis neu berechnet werden. Um das zu vermeiden wird die Quelle durch eine Ersatzspannungsquelle ersetzt. Den Strom zwischen den Klemmen A und B kann man so berechnen, dass man die Quelle und den Verbraucher getrennt betrachtet. Der Eingangswiderstand wird berechnet, indem alle idealen Spannungsquellen als Kurzschluss und alle idealen Stromquellen als unterbrochen dargestellt werden [8] (**Bild 6.13**).

$$I_{AB} = \frac{U_{AB0}}{R_i + R} \quad (6.14)$$

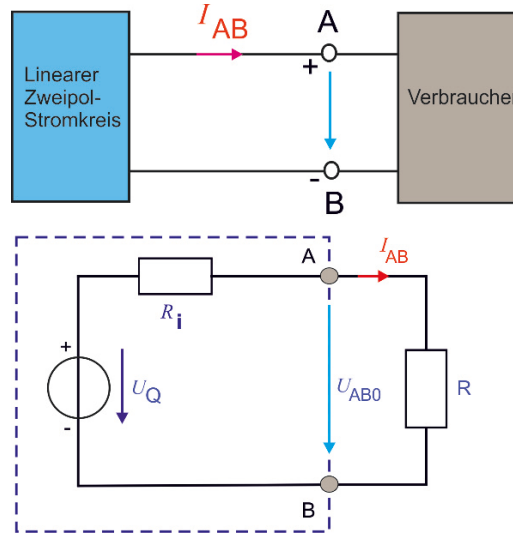


Bild 6.13: Thevenen Theorem

6.6 Norton Theorem (Lineare Stromquelle)

Das Norton Theorem besagt, dass ein lineares Netzwerk durch eine Stromquelle und parallel dazu einen Widerstand ersetzt werden kann. Der Strom, der im Netz fließt, ist ein Kurzschlussstrom, wenn die unabhängige Quelle unterbrochen wird [8] (Bild 6.14).

$$U_{AB} = \frac{I_k}{G_i + G} \quad (6.15)$$

6.7 Überlagerungssatz (Superpositionstheorem)

Sind mehrer Spannungsquellen in einem Netzwerk mit linearen Bauelementen vorhanden, so können die Ströme und Spannungen an den einzelnen Widerständen durch Überlagerung berechnet werden. Dabei werden nacheinander die von einer einzelnen Spannungsquellen verursachten Teilströme bzw. Teilspannungen ermittelt, wobei die übrigen Spannungsquellen gleich Null gesetzt werden. Die errechneten Einzelspannungen und -ströme werden dann nach Betrag und Richtung addiert (überlagert) [8] (Bild 6.15).

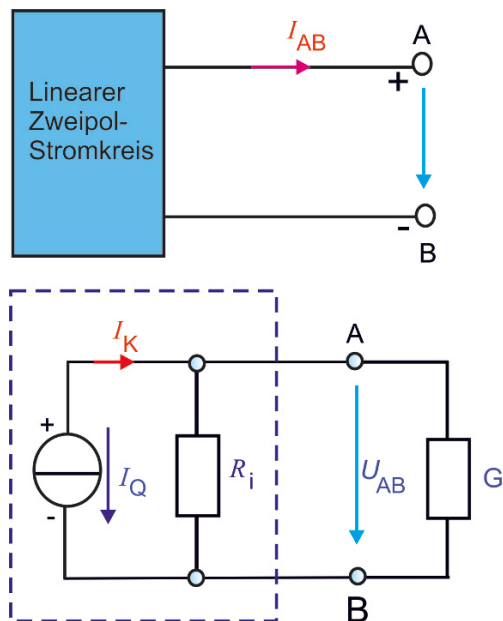


Bild 6.14: Norton Theorem

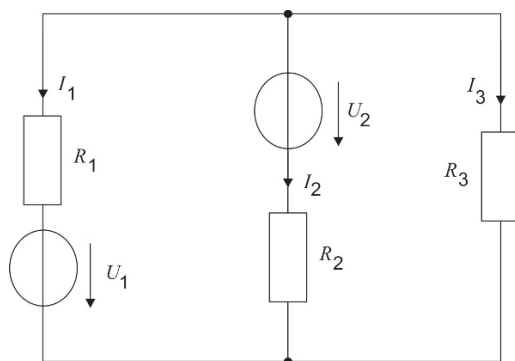
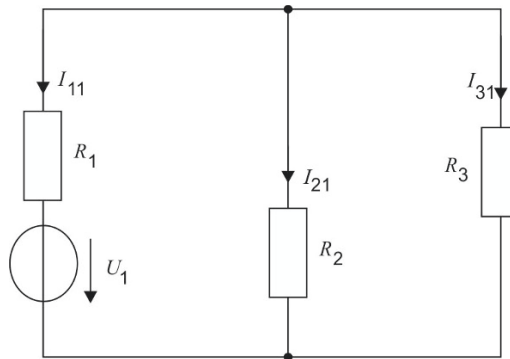


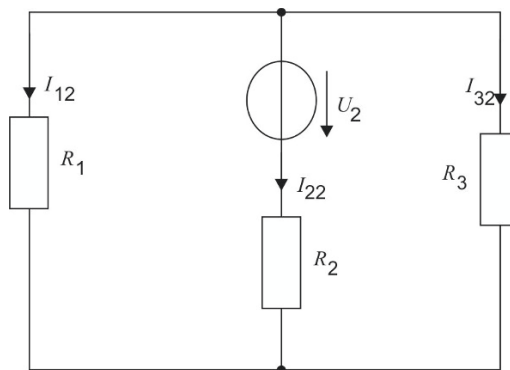
Bild 6.15: Überlagerungssatz

1. Schritt (Bild 6.16):**Bild 6.16:** Überlagerungssatz

$$I_{21} = \frac{R_2 \cdot U_1}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1} \quad (6.16)$$

$$I_{31} = \frac{R_3 \cdot U_1}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1} \quad (6.17)$$

$$I_{11} = -I_{21} - I_{31} \quad (6.18)$$

2. Schritt (Bild 6.17):**Bild 6.17:** Überlagerungssatz

$$I_{12} = \frac{R_3 \cdot U_2}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1} \quad (6.19)$$

$$I_{32} = \frac{R_1 \cdot U_2}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1} \quad (6.20)$$

$$I_{22} = -I_{12} - I_{32} \quad (6.21)$$

Resultierende Ströme:

$$I_1 = I_{11} + I_{12} \quad (6.22)$$

$$I_2 = I_{21} + I_{22} \quad (6.23)$$

$$I_3 = I_{31} + I_{32} \quad (6.24)$$

7 Elektrische Quellen

In diesem Kapitel werden folgende Themen behandelt:

1. die ideale- und reale Quelle und
2. die Zweipoltheorie.

Aktive Zweipole können an ihren Klemmen eine Spannung aufrecht erhalten und durch einen angeschlossenen passiven Zweipol (Verbraucher) einen Strom treiben.

Man bezeichnet solche Zweipole als Spannungs- bzw. Stromquellen. Um die Größen U , I und P zu untersuchen, werden Ersatzschaltungen definiert. Die Elemente dieser Schaltungen sind Spannungs- und Stromquellen, die hier vorgestellt werden (Bild 7.1).

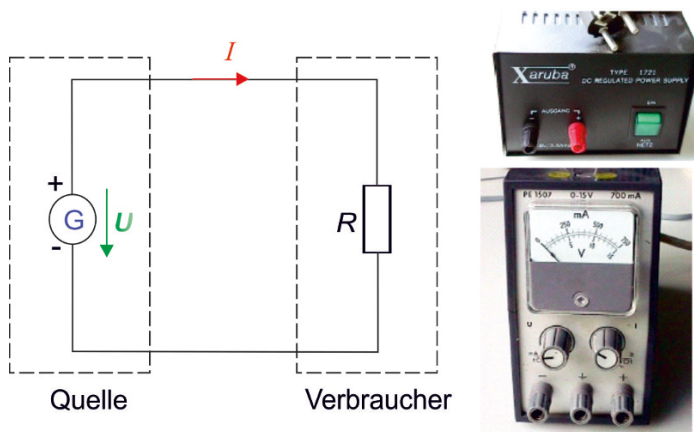


Bild 7.1: Lineare Zweipole

Elemente in Gleichstromkreisen sind aktive und passive Zweipole. Aktive Zweipole sind Spannungsquellen und Stromquellen. Passive Zweipole sind z.B. Ohmsche Widerstände.

7.1 Ideale Spannungsquelle

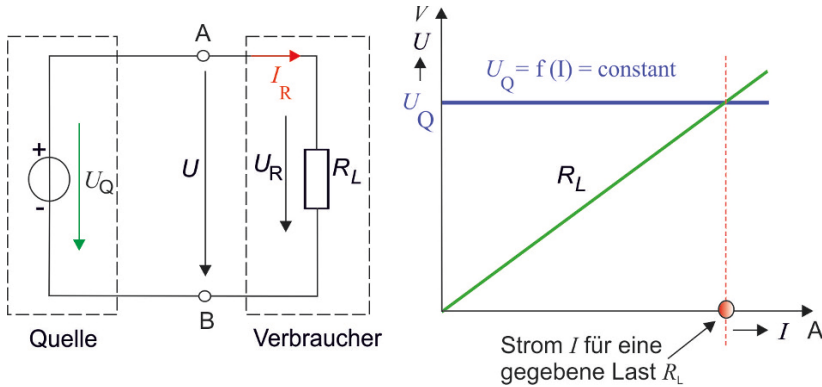


Bild 7.2: Ideale Spannungsquelle mit Lastdiagramm

Eine ideale elektrische Spannungsquelle hat eine eingeprägte, d.h. konstante und insbesondere von der Größe des Stromes, der durch die Quelle fließt, unabhängige Quellenspannung zwischen ihren Klemmen. Der Innenwiderstand einer idealen Spannungsquelle ist gleich null (**Bild 7.2**).

$$I = \frac{U}{R_L} \quad (7.1)$$

Wobei

$$U = U_Q$$

ist.

7.2 Reale Spannungsquellen

Galvanische Elemente, Batterien, Akkumulatoren, Thermoelemente und elektronische Spannungsquellen sind reale Spannungsquellen.

Das reale Verhalten dieser Quellen wird durch:

- die Leerlaufspannung U_0
- den Kurzschlussstrom I_k
- den Innenwiderstand R_i

beschrieben und durch eine Ersatzschaltung aus einer idealen Spannungsquelle mit Innenwiderstand nachgebildet (**Bild 7.3**).

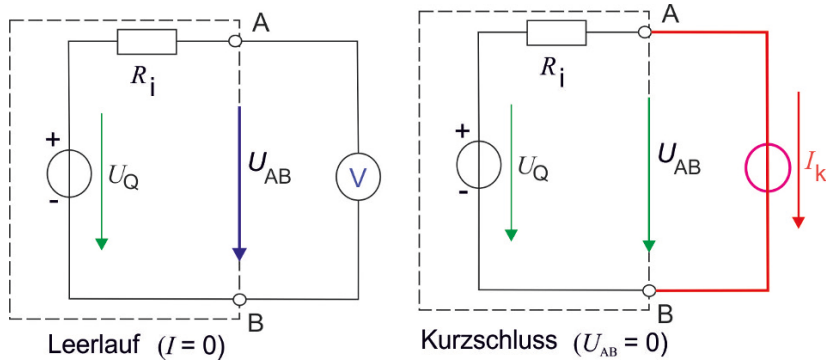


Bild 7.3: Reale Spannungsquellen

Leerlaufspannung: Ohne Belastung wird zwischen den Klemmen AB die Leerlaufspannung U_0 , $U_{AB} = U_0 = U_Q$ gemessen. Aus der Leerlaufmessung ergibt sich die innere Quellenspannung $U_Q = U_0$.

Kurzschlussspannung: Im Kurzschluss wird zwischen den Klemmen AB der Kurzschlussstrom $I_k = U_Q/R_i$ gemessen, dabei ist $U_{AB} = 0$.

Aus der Kurzschlussmessung und der Leerlaufspannung berechnet sich der Innenwiderstand $R_i = U_0/I_k$.

Aus den beiden Messungen ergeben sich die Eigenschaften der realen Quelle. Das **Bild 7.4** zeigt das Belastungsdiagramm einer realen Spannungsquelle mit einem linearen Innenwiderstand.

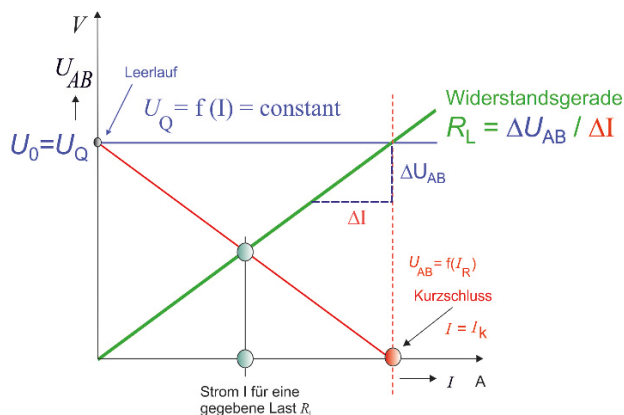


Bild 7.4: Belastungsdiagramm einer realen Spannungsquelle

Das **Bild 7.5** zeigt das Belastungsdiagramm einer realen Spannungsquelle mit einem nichtlinearen Innenwiderstand.

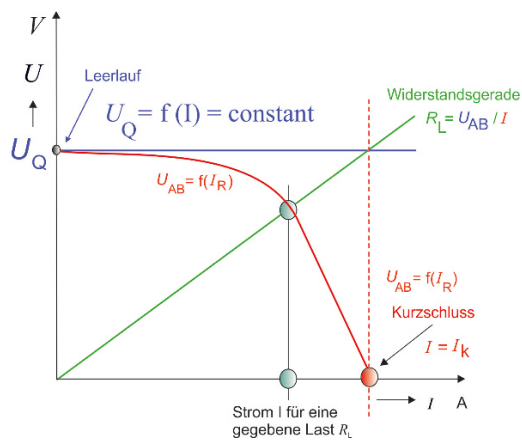


Bild 7.5: Belastungsdiagramm einer realen Spannungsquelle

7.3 Ideale Stromquellen

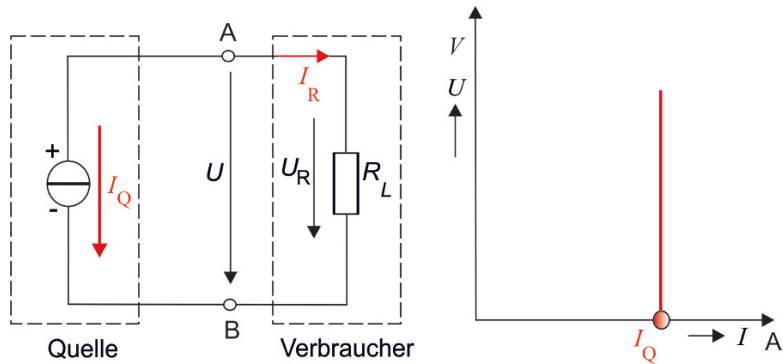


Bild 7.6: Ideale Stromquellen

Der Klemmenstrom I ist unabhängig von der Klemmenspannung U und konstant (Bild 7.6).

7.4 Reale Stromquellen

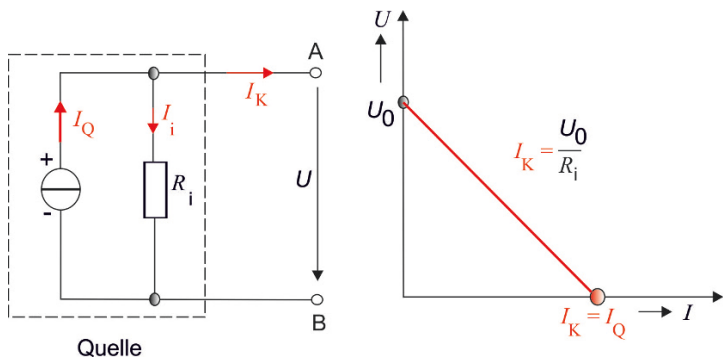


Bild 7.7: Reale Stromquellen

Der Klemmenstrom I sinkt mit steigender Klemmenspannung U (Bild 7.7).

7.5 Zweipoltheorie

Eine beliebige Schaltung, die an nur zwei Punkten elektrisch zugänglich ist bzw. nur von zwei Punkten aus betrachtet wird, wird Zweipol bezeichnet (Bild 7.8).

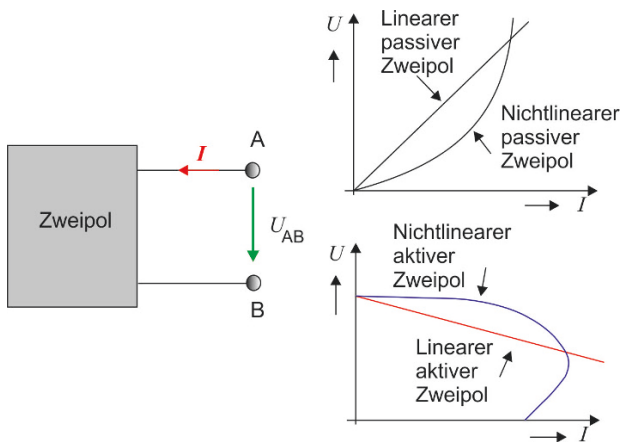


Bild 7.8: Zweipol

Für die Berechnung werden Ersatzschaltbilder von aktiven und passiven Zweipolen gebildet.

7.6 Leistungsbilanz im Grundstromkreis

Zur Erzielung eines hohen Wirkungsgrades muss der Innenwiderstand des Energieerzeugers möglichst gering sein ($R_i \Rightarrow 0$). Maximal an den Verbraucher R_L abgebbare Leistung $P_{L\max}$ ist nur dann möglich, wenn R_i und R_L gleich groß sind, so wird in beiden Widerständen die gleiche Leistung umgesetzt. Man nennt diesen Fall Leistungsanpassung. Bei Leistungsanpassung wird im Lastwiderstand R_L die maximale Leistung umgesetzt (**Bild 7.9**).

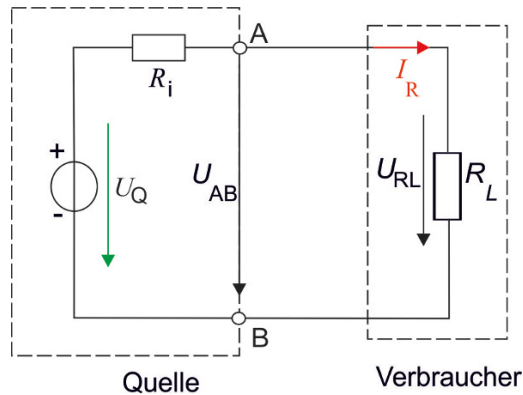


Bild 7.9: Leistungsbilanz im Grundstromkreis

$$P_{L\max} = \frac{U_Q^2}{4 \cdot R_i} = \frac{U_Q^2}{4 \cdot R_L} \quad (7.2)$$

8 Messungen der elektrotechnischen Größen

In diesem Kapitel werden folgende Themen kurz erläutert [3]:

1. Strommessungen,
2. Spannungsmessungen,
3. Aufbau von Schaltungen.

Elektrische Größen wie Strom, Spannung und Widerstand (**Bild 8.1**) werden gemessen, um eine Aussage treffen oder Planungsaufgaben erledigen zu können. Durch die Messung darf die Messgröße des Messobjekts nicht beeinflusst werden. Daher muss ein Spannungsmessgerät einen möglichst großen Innenwiderstand haben $R_i \Rightarrow \infty$.

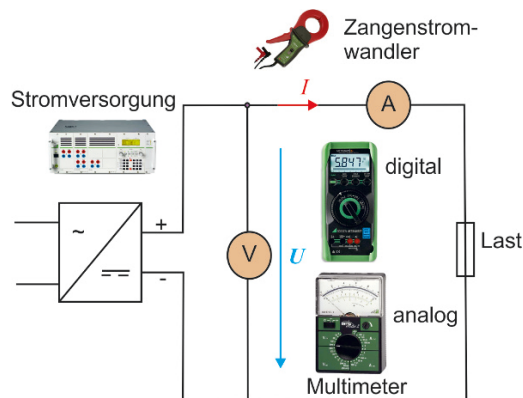


Bild 8.1: Messungen der elektrotechnischen Größen [14]

8.1 Messen der Stromstärke

Bei der Messung eines Stromes muss der Stromkreis grundsätzlich aufgetrennt werden. Ein Strommesser ist ein elektrisches Gerät und besitzt deshalb auch Widerstandseigenschaften. Bei der Messung wird der Stromkreis gestört, weil sich durch das Einfügen des Messgerätes der Gesamtwiderstand erhöht. Dadurch wird das Messergebnis verfälscht. Über dem Strommesser selbst fällt, weil er einen Widerstand besitzt, eine Spannung ab. Der innere Widerstand R_i eines Strommessgerätes soll möglichst klein sein; der Idealfall wäre mit $R_i = 0$ erreicht. Solche Messgeräte gibt es nicht. Bei vielen Anwendungen kann man aber den Innenwiderstand eines Stromstärkemessgerätes vernachlässigen.

8.2 Messung der Spannung und des Spannungsfalls

Bei einer Spannungsmessung muss der Stromkreis nicht geöffnet werden. Das Messgerät wird parallel zum messenden Objekt angeschlossen. Der Spannungsmesser stört den Stromkreis. Der innere Widerstand R_i eines Spannungsmessers soll möglichst hoch sein; der Idealfall wäre mit $R_i = \infty$ erreicht. Zur Messung von Stromstärke und Spannung werden häufig sogenannte elektronische Vielfachmessgeräte oder Multimeter verwendet. Diese sind so ausgelegt, dass die durch ihre Eigenschaften bedingten Messfehler sehr klein sind und überwiegend vernachlässigt werden können. Darüber hinaus bieten sie fast immer die Möglichkeit der Widerstandsmessung.

8.3 Spannungsquelle und Innenwiderstand

Spannungsquellen sind: Batterien und Akkumulatoren, Generatoren und Transformatoren, Solarzellen oder Mikrofone.

Ihre gemeinsame Eigenschaft ist: Sie erzeugen elektrische Spannung und bei Belastung, d.h., wenn sie einen Strom liefern, sinkt ihre Spannung ab und die Stromstärke ist endlich. Wenn die Spannungsquelle belastet wird, dann steigt der Spannungsabfall über dem Innenwiderstand, die Klemmenspannung U_{AB} sinkt im selben Maß. Bei einer idealen Spannungsquelle ist: $R_i = 0$. Daraus folgt eine von der Belastung unabhängige konstante Ausgangsspannung. Das ist technisch in Grenzen möglich. Hierbei ändert sich der Innenwiderstand R_i in Abhängigkeit von der Belastung. Jede Spannungsquelle ist, wenn sie belastet wird, auch gleichzeitig eine Stromquelle. Im Kurzschlussfall wird der Strom nur durch den Innenwiderstand begrenzt. Das bedeutet, dass an den Klemmen der Spannungsquelle keine Spannung messbar ist. Diese sind ja auch kurz geschlossen, dh. $R_{AB} = 0$.

Ist der Innenwiderstand R_i der Spannungsquelle gegenüber dem Arbeitswiderstand klein, dann betrachtet man die Energiequelle als Spannungsquelle. Ist der Innenwiderstand R_i der Spannungsquelle gegenüber dem Arbeitswiderstand groß, dann betrachtet man die Energiequelle als Stromquelle.

8.4 Leistungsmessung bei Drehstrom

Bei symmetrisch aufgebauten Drehstromnetzen kann man die Leistung mit der Aronschaltung ohne Neutralleiter mit zwei Messgeräten messen (**Bild 8.2**). Eine andere Möglichkeit ist, die Messung mit einem Neutralleiter N durchzuführen. Wenn das Netz unsymmetrisch ist, sind drei Messgeräte erforderlich. Die Gesamtleistung beträgt:

$$P_G = P_{12} + P_{32}$$

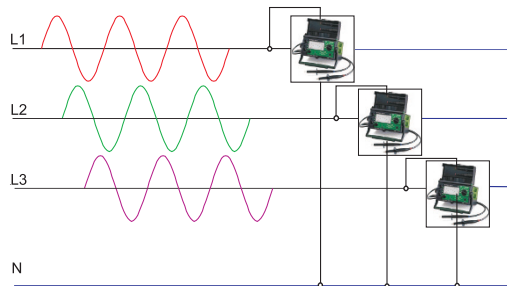


Bild 8.2: Leistungsmessung bei Drehstrom

9 Elektrische Felder

In diesem Kapitel werden folgende Themen behandelt [5], [7]:

1. das Strömungsfeld,
2. das elektrische Feld und
3. das magnetische Feld.

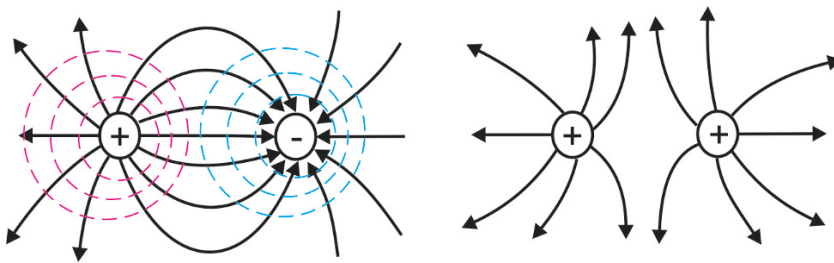


Bild 9.1: Elektrische Felder

Wir brauchen Modelle, mit denen wir elektrische Vorgänge oder die Energieübertragung erklären können. Das elektrische Feld ist ein Raum, der Träger elektrischer Ladungen umgibt. Dieser Raum wird durch die Feldlinien von negativen und positiven Ladungen dargestellt. In diesem Feld werden auf die Ladungen elektrische Kräfte ausgeübt (**Bild 9.1**).

Skalare Feldgröße: ist eine globale Feldgröße und ungerichtet, z.B. elektrische Spannung U $[U] = V$.

Vektorielle Feldgröße: ist eine lokale Feldgröße, durch Betrag und Richtung gekennzeichnet, z. B. elektrische Feldstärke $\vec{E}$ $[E] = V/m$.

Die Feldlinien beginnen immer an einer positiven Ladung und enden an einer negativen Ladung. Ruhende Ladungen bilden ein elektrostatisches Feld (z.B. Kondensator) und bewegte Ladungen ein elektromagnetisches Feld (z.B. Spule). Nach

dieser Faradayschen Annahme erfolgt die Kraftwirkung auf einen Körper durch den besonderen Zustand, den der Raum durch die Anwesenheit eines anderen Körpers erfährt. Diesem besonderen Raumzustand, der sich durch Kraftwirkungen auf andere Körper (Masse, Ladung, Magnetpole) äußert, wird der Begriff Feld zugeordnet.

Was bedeutet der Begriff Feld? Ein Feld ist ein Raumgebiet, das durch einen besonderen physikalischen Zustand gekennzeichnet ist. Der Raum ist in diesem Zustand Träger von Energie. Ein Feld wird durch Feldgrößen beschrieben. Ohne diese Felder ist die Wirkungsweise elektrischer Bauelemente und die Funktion elektrischer Maschinen undenkbar.

Das Feldmodell beschreibt die Kraftwirkung auf einen Körper als Folge eines anderen Körpers (Ursache) in einem Raumpunkt durch die Einführung des Feldbegriffes.

Das elektromagnetische Feld ist die Gesamtheit aller Punkte eines Raumes mit einem besonderen physikalischen Zustand, der durch die physikalischen Größen, ruhende elektrische Ladung, bewegte elektrische Ladung, Änderung der elektrischen Flussdichte hervorgerufen wird.

Maxwell hat 1848 die Feldtheorie entwickelt. Es gibt vier grundlegende Felder:

1. das elektrische Strömungsfeld im Leiter
2. das elektrostatische Feld in Nichtleiter
3. das magnetische Feld
4. das elektromagnetische Feld

Alle Feldgrößen sind im Allgemeinen ortsabhängige und zeitabhängige Größen.

Ein Feld ist ein Zustand des Raumes, bei dem in jedem Raumpunkt einer physikalischen Größe der Feldgröße ein Wert und ggf. eine Richtung zugeordnet werden kann.

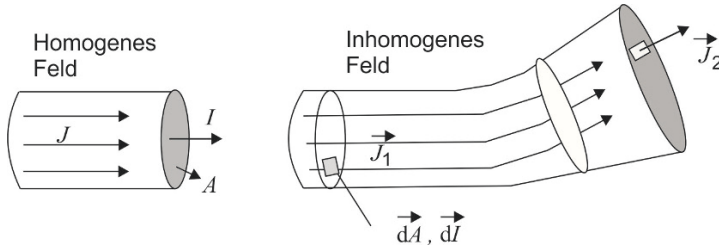
Nur Wert: Skalarfeld

Wert und Richtung: Vektorfeld

Bei Vektorfeldern wird zwischen homogenen und inhomogenen Feldern unterschieden (**Bild 9.2**).

9.1 Das elektrische Strömungsfeld

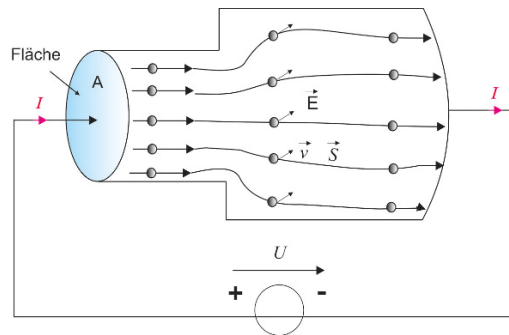
Wenn der Stromkreis geschlossen wird, fließen im Leiter freibewegliche Ladungsträger in Richtung der Kraftwirkung. Diese Ladungsbewegung wird als elektri-

**Bild 9.2:** Felder

ches Strömungsfeld beschrieben. In diesem Kapitel werden folgende Themen behandelt [3]:

1. das elektrische Strömungsfeld,
2. die Ladungsträgerbewegung,
3. der elektrische Widerstand und
4. einfache Strömungsfelder.

Die Ladungsträger bewegen sich auf den gekennzeichneten elektrischen Feldlinien (**Bild 9.3**).

**Bild 9.3:** Strömungsfeld

Die Leitungselektronen bewegen sich im Atomgitter und stoßen dabei mit den festsitzenden Atomen zusammen. Aufgrund seiner Temperaturbewegung durchläuft das Elektron im Festkörper ohne das Vorhandensein eines beschleunigenden elektrischen Feldes eine statistisch ungeordnete Bahn. Es kommt dabei laufend zu Zusammenstößen des Elektrons mit anderen Elektronen und den Ionen des Festkörpergitters, so dass eine ungeordnete Bewegung entsteht.

Feldgrößen des Strömungsfeldes:

Wird an den elektrischen linearen Leiter (Durchmesser konstant und homogenes Material) eine zeitlich konstante Spannung $U > 0$ angelegt, so wird ein Feld mit

der elektrischen Feldstärke E im Leiter eine Kraft auf das betrachtete Elektron ausüben.

$$Q = N \cdot q = N \cdot e \quad (9.1)$$

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \quad (9.2)$$

Der Temperaturbewegung des Elektrons wird sich eine Driftbewegung in Richtung der auftretenden Kraft überlagern. Das negativ geladene Elektron mit der Elementarladung $-e$ bewegt sich entgegengesetzt zur Richtung des elektrischen Feldes. Da zu Beginn der elektrotechnischen Forschungen die Stromrichtung für positiv geladene Teilchen definiert wurde, fließt der tatsächliche Elektronenstrom entgegengesetzt zur Zählpfeilrichtung. Die elektrische Stromdichte S ist proportional zum elektrischen Feld E . Der Proportionalitätsfaktor ist die elektrische Leitfähigkeit des Materials κ .

$$E = \frac{U}{l}, \quad S = \kappa \cdot E \quad (9.3)$$

Die Berechnung der Temperaturabhängigkeit von Widerständen erfolgt bei 20°C aus dem spezifischen Widerstand und den geometrischen Abmessungen. Für Widerstände als Bauelemente werden vom Hersteller Widerstandswerte für eine Referenztemperatur von $T = 20^\circ\text{C}$ angegeben. Dann lässt sich der temperaturabhängige Wert berechnen. Für Kabel und Leitungen findet man in DIN-VDE-Tabellen oder in Herstellerkatalogen Widerstandswerte abhängig vom Leiterquerschnitt.

9.2 Das elektrostatische Feld

Das elektrostatische Feld kann durch elektrische Feldlinien dargestellt werden, die an positiven elektrischen Ladungen beginnen und an negativen elektrischen Ladungen enden. Die Ladungen ruhen in elektrostatischen Feldern. Die Stromdichte geht gegen Null.

In diesem Kapitel werden folgende Themen behandelt [3], [5], [7]:

1. die Größen Kraft, Feldstärke, Arbeit,
2. der Plattenkondensator,
3. die Ladung, elektrische Flussdichte, Feldstärke und Permittivität,

4. die Kapazität von Plattenkondensatoren und
5. die Reihen- und Parallelschaltungen von Kondensatoren.

In einem Leiter wurde der elektrische Strom als gerichteter Ladungsträger mit dem Strömungsfeld dargestellt. Wir wollen nun den Leiter durch einen Kondensator (**Bild 9.4**) ersetzen und die Zusammenhänge erklären (**Bild 9.5**).

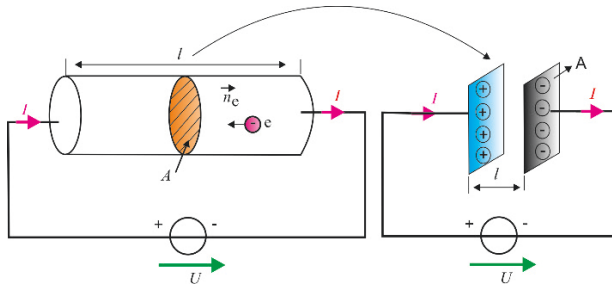


Bild 9.4: Statisches Feld

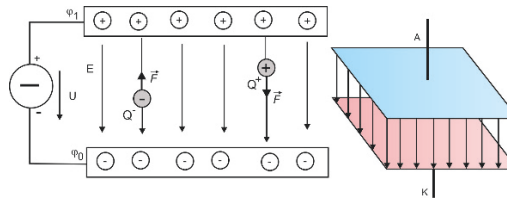


Bild 9.5: Elektrostatisches Feld

Als "elektrische Feldstärke" E bezeichnet man den Zustand eines Raumes, der durch elektrische Ladungen verursacht wird. Das elektrische Feld ist ein Vektorfeld. Der lokale Feldvektor beschreibt die Kraftwirkung auf eine Probeladung bezüglich Größe und Richtung. Das elektrische Feld ist ein Quellenfeld. Die Quellen des elektrischen Feldes sind die Ladungen. Die positiven Ladungen sind die Quellen des Feldes. Die negativen Ladungen sind die Senken des Feldes (**Bild 9.6**).

Feldlinien verlaufen in jedem Raumpunkt tangential zu den Vektoren des Vektorfeldes; sie geben damit die Richtung des Vektorfeldes an. Der Richtungssinn der Vektoren wird durch einen Pfeil auf den Linien angegeben.

Man erhält eine Feldlinie, wenn man von einem gegebenen Punkt des Raumes ein kleines Stück des in Richtung des Feldstärkevektors voranschreitet und dort erneut die Richtung der Kraft bestimmt usw. Die Darstellung von Vektorfeldern wird bei einer großen Anzahl von Vektoren mit verschiedenen Richtungen und Beträgen unübersichtlich. Man führt daher Feldlinien zur Darstellung des Feldes

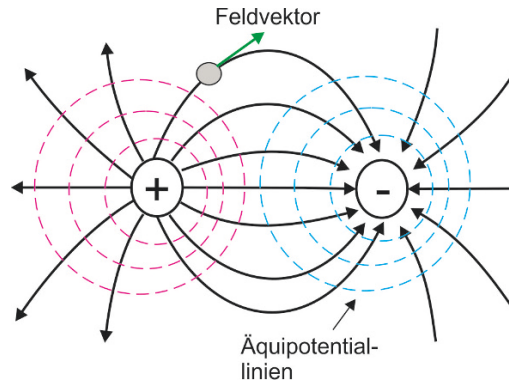


Bild 9.6: Darstellung des elektrischen Feldes durch Feldlinien

ein. Der Absolutbetrag der Feldstärke wird durch die Dichte der Feldlinien im Raum (in der Ebene) dargestellt. Da in jedem Raumpunkt nur eine Wirkungsrichtung der Kraft existieren kann, können sich Feldlinien niemals schneiden. Ein Feld wird als homogen bezeichnet, wenn die Feldgröße in jedem Raumpunkt den gleichen Betrag und die gleiche Richtung hat, anderenfalls ist das Feld inhomogen. Bei der Verschiebung entgegen der Feldrichtung wird eine Masse (Ladung) auf ein höheres Niveau potentieller Energie gehoben. Linien gleicher potentieller Energie werden als Äquipotentiallinien bezeichnet. Bei der Verschiebung entlang einer Äquipotentiallinie wird weder vom Feld noch von außen Arbeit verrichtet.

9.2.1 Elektrische Spannung und Potential

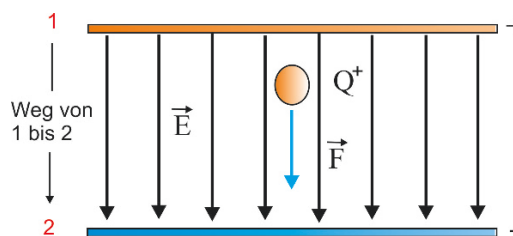


Bild 9.7: Elektrische Spannung

Bei der Verschiebung der positiven Ladung Q^+ von Plus nach Minus wird vom Feld Arbeit geleistet (**Bild 9.7**). Eine bewegliche (positive) Probeladung Q folgt im elektrischen Feld der auf sie einwirkenden Kraft F . Daher stammt ihre Bewegungsenergie aus dem Feld. Umgekehrt muss Energie aufgewendet werden, wenn die Ladung gegen die Kraftwirkung verschoben werden soll. Wir wollen die Arbeit W , eine skalare Größe, als positiv ansehen, wenn sie bei positiver Ladung vom Feld aufgebracht wird und als negativ, wenn sie dem Feld zugeführt wird. Bei der

Ladungsverschiebung zwischen zwei Raumpunkten A und B entlang eines Weges s (zu dem das Wegelement ds gehört) lässt sich die Arbeit aus dem Linienintegral der elektrischen Feldstärke berechnen.

$$W_{12} = F \cdot s = Q \cdot E \cdot s \quad (9.4)$$

Zur Beschreibung der potentiellen Energie einer Ladung im elektrischen Feld E wird der Begriff des elektrischen Potentials definiert:

Das elektrische Potential ist die auf die Ladung bezogene Arbeit. Die Potentialdifferenz ist die Spannung.

$$\varphi = \frac{W_{\text{pot}}}{Q} \quad (9.5)$$

Ihre Einheit ist:

$$\varphi] = \frac{[W]}{[Q]} = \frac{Ws}{As} = \frac{VAs}{As} = V$$

Die elektrische Spannung ist eine skalare Größe. Sie ist positiv, wenn das Integral in Richtung des elektrischen Feldes berechnet wird. Die Richtung der Spannung wird mit einem Bezugspfeil (kein Vektor) gekennzeichnet.

9.2.2 Elektrische Verschiebungsdichte D

Die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ beschreibt die Wirkung des elektrischen Feldes an einem Ort. Sie ist abhängig von der erregenden Ladung, dem Abstand von dieser Ladung und dem Material, welches den Feldraum ausfüllt. Gesucht wird eine Größe zur Beschreibung der Ursache am betrachteten Ort. Diese Größe ist erforderlich, da die das Feld erregenden Ladungen oft nicht unmittelbar zur Messung zur Verfügung stehen.

Die Verschiebungsflussdichte D beschreibt die dem Raumpunkt feldgemäße zugeordnete Ursache des elektrischen Feldes unabhängig vom Raumzustand. Ihre Richtung stimmt mit der der Feldstärke E überein. Ihre Ursache sind Ladungen, die sich an einer anderen Stelle im Raum befinden.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \vec{E} \quad (9.6)$$

Wobei ϵ_0 die Feldkonstante und ϵ_r Materialkonstante ist.

9.2.3 Verschiebungsstrom

Es stellt sich die Frage, warum bei Ladungsänderung oder Spannungsänderung am Kondensator ein Strom fließt, wo doch eine Ladungsträgerbewegung (nach unserer üblichen Stromvorstellung) durch das nichtleitende Dielektrikum unmöglich ist. Der Verschiebungsstrom i_V fließt nur, wenn durch Spannungsänderung Ladungstrennung und damit Ladungstransport erfolgen (**Bild 9.8**).

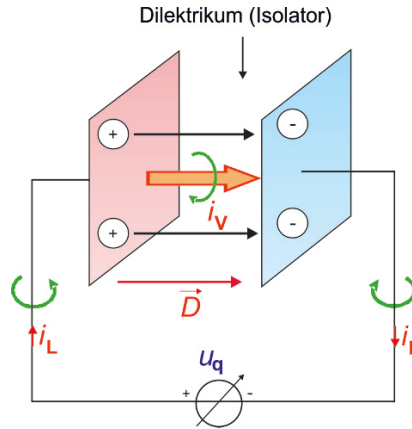


Bild 9.8: Verschiebungsstrom

$$i_V = \frac{dQ}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (9.7)$$

9.2.4 Kondensator und Kapazität

Kondensatoren sind Bauelemente, die in elektrischen Schaltungen und Netzen zum Einsatz kommen (**Bild 9.9**). Sie werden z. B. in Gleichrichterschaltungen zur Glättung der Spannung oder in Wechselstromkreisen zur Phasenverschiebung (Kompensation) eingesetzt. Ein Kondensator ist aus zwei elektrischen Leitern aufgebaut, zwischen denen sich ein Isolator oder Nichtleiter (Dielektrikum) befindet.

Bei einer Anordnung, in der ein elektrisches Feld existiert, interessiert oft nicht die genaue Verteilung der Feldstärke und des Potentials, sondern vielmehr Größen, die das Gesamtfeld von außen her charakterisieren:

1. die elektrische Ladung Q als Quelle des Feldes,
2. die elektrische Spannung U als messbare Potentialdifferenz zum Nachweis der Existenz eines Feldes,
3. Kraftwirkungen zwischen den Elektroden.

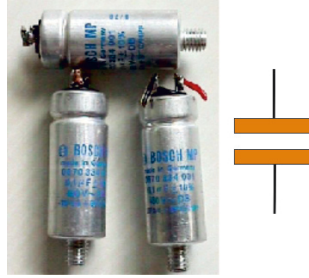


Bild 9.9: Verschiedene Kondensatoren

Wird an einen Kondensator eine Spannung angelegt, so bildet sich zwischen den Platten ein elektrisches Feld, das wir jetzt genauer untersuchen wollen. Wir betrachten zwei dünne, beliebig geformte aber parallele Platten mit der Fläche A , deren Abstand $d \ll A$ ist (**Bild 9.10**). Dann ist das inhomogene Randfeld vernachlässigbar und zwischen den Platten kann ein homogenes elektrisches Feld angenommen werden.

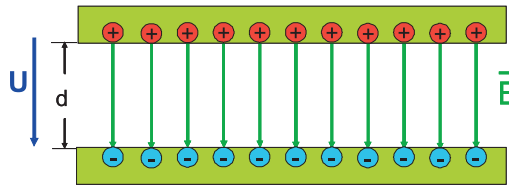


Bild 9.10: Plattenkondensator

Die Kapazität eines Plattenkondensators ist:

$$Q = C \cdot U \Rightarrow C = \frac{Q}{U} \quad C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (9.8)$$

Mit der Einheit

$$[C] = \frac{[Q]}{[U]} = \frac{\text{As}}{\text{V}} = 1 \text{Farad} = 1\text{F}$$

Mit der Kapazität C wird angegeben, wie viel Ladung Q pro Volt auf den Elektroden eines Kondensators gespeichert werden kann.

9.2.5 Reihen- und Parallelschaltung von Kondensatoren

Die Reihenschaltung von Kondensatoren wird in **Bild 9.11** gezeigt.

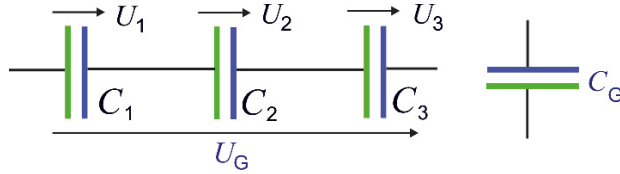


Bild 9.11: Reihenschaltung von Kondensatoren

Die Reihenschaltung kann man sich so vorstellen, dass die Plattenfläche gleich bleibt, aber der Abstand d sich vergrößert d.h. $C \sim 1/d$.

$$Q = C_1 \cdot U_1 = C_2 \cdot U_2 = C_3 \cdot U_3 = C_G \cdot U_G \quad (9.9)$$

$$U_G = U_1 + U_2 + U_3 = \quad (9.10)$$

$$\frac{Q}{C_G} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} \Rightarrow \frac{1}{C_G} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (9.11)$$

$$C_G = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (9.12)$$

Bei der Reihenschaltung von Kondensatoren ist der Kehrwert der Gesamtkapazität gleich der Summe der Kehrwerte der Einzelkapazitäten (analog zur Parallelschaltung zweier Widerstände).

9.2.6 Parallelschaltung von Kondensatoren

Die Parallelschaltung von Kondensatoren wird in **Bild 9.12** gezeigt. Die Parallelschaltung kann man sich so vorstellen, dass der Abstand d unverändert bleibt, aber die Plattenfläche sich vergrößert d.h. $C \sim A$.

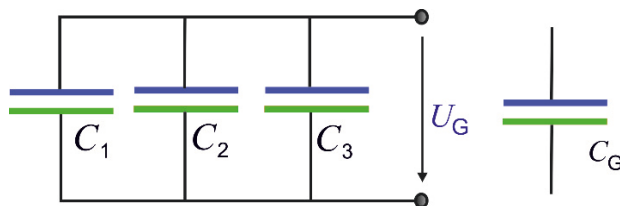


Bild 9.12: Parallelschaltung von Kondensatoren

$$Q_G = Q_1 + Q_2 + Q_3 = C_G \cdot U_G \quad (9.13)$$

$$Q_G = Q_1 + Q_2 + Q_3 = C_1 \cdot U_G + C_2 \cdot U_G + C_3 \cdot U_G = U_G \cdot (C_1 + C_2 + C_3) \quad (9.14)$$

$$C_G = C_1 + C_2 + C_3 \quad (9.15)$$

Bei der Parallelschaltung von Kondensatoren ergibt sich die Gesamtkapazität also aus der Summe der Einzelkapazitäten (analog zur Reihenschaltung von Widerständen).

9.2.7 Energie des elektrischen Feldes

Im elektrostatischen Feld wird Energie gespeichert. Die elektrische Energie ist abhängig von:

1. der elektrischen Erregung D (Ursache des Feldes),
2. der elektrischen Feldstärke E (Wirkung des Feldes),
3. dem betrachteten Volumen V .

Für die in einem Kondensator gespeicherte Energie gilt:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (9.16)$$

Gegenüber einem Widerstand hat ein Kondensator einen grundverschiedenen Energieumsatz. Beim Widerstand setzt unmittelbar mit dem Stromfluss ein nicht umkehrbarer Umsatz elektrischer Energie in Wärme ein. Ein Widerstand wirkt als (einseitige) Energiedurchgangsstelle an die Umgebung. Ein Kondensator dagegen speichert Energie.

Im Kondensator erfolgt eine Energieaufnahme oder -abgabe nur, wenn sich der Verschiebungsfluss, also die Ladung, ändert. Weil das elektrostatische Feld aber durch ruhende Ladungen gekennzeichnet ist, bleibt die Energie vom Ende der Aufladung ($dQ/dt = 0 \Rightarrow I = 0$) als dielektrische Energie im Feld gespeichert. Das drückt sich durch die Spannung U_C aus, auf die der Kondensator am Ende des Ladevorganges geladen ist. Der Kondensator gibt keinen Energiestrom an die Umgebung ab. Beim Entladen wird die gespeicherte dielektrische Energie vollständig in den elektrischen Kreis zurückgeführt.

9.2.8 Ladung und Entladung eines Kondensators

Durch den Anschluss eines Kondensators an eine Spannungsquelle wird der Kondensator geladen (**Bild 9.13**). Die Spannungsquelle bewirkt, entsprechend der angeschalteten Polarität, eine Ladungstrennung auf den Elektroden des Kondensators. Bei der Ladungstrennung werden Ladungen durch die angeschlossenen Leitungen und die Quelle bewegt. Es fließt kurzzeitig der Verschiebungsstrom. Die Ladungsbewegung, und damit der Stromfluss, ist beendet, wenn die Spannung $U_C = U_0$ ist. Auf dem Kondensator ist dann die Ladung $Q = C \cdot U$ gespeichert.

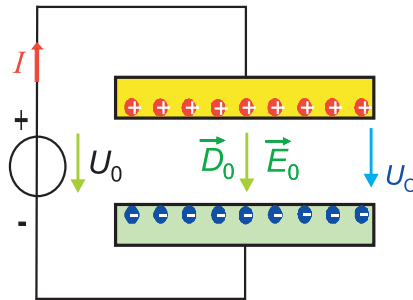


Bild 9.13: Ladung eines Kondensators

Für die Ladung eines Kondensators gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Ladung über eine Konstantstromquelle
2. Ladung über eine Spannungsquelle mit Vorwiderstand

Ladung des Kondensators (Bild 9.14):

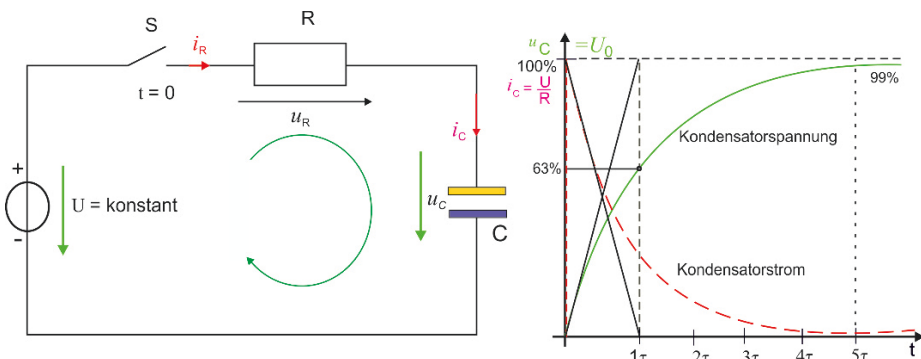


Bild 9.14: Ladung des Kondensators über einen Vorwiderstand

Zur Berechnung der Spannung u_C wird ein Maschenumlauf aufgestellt:

$$U_0 = R \cdot i_C + u_C, \quad U_0 = R \cdot C \cdot \frac{du_C}{dt} + u_C \quad (9.17)$$

Als Lösung dieser Differentialgleichung erhält man:

$$u_C(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \Rightarrow i_C(t) = \frac{U}{R} \cdot (e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (9.18)$$

mit

$$\tau = R \cdot C$$

Entladung des Kondensators:

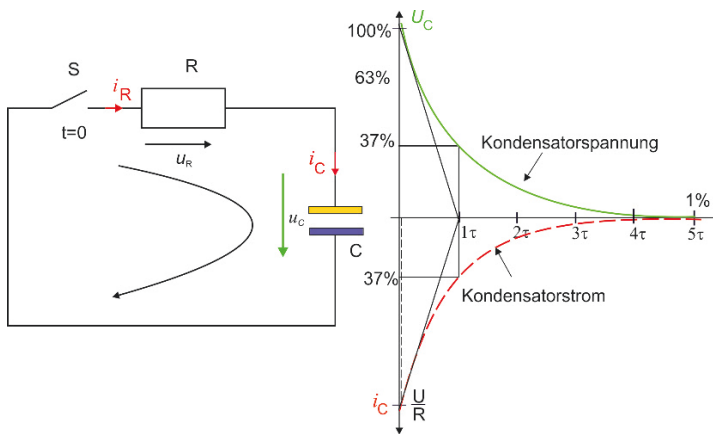


Bild 9.15: Entladung des Kondensators über einen Vorwiderstand

Verlauf der Kondensatorentladung (Bild 9.15):

$$u_C(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \Rightarrow i_C(t) = -\frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9.19)$$

9.2.9 Anwendung von Kondensatoren

Kondensatoren werden in vielen Bereichen der Elektrotechnik eingesetzt wie z.B.

1. zur Verbesserung des Leistungsfaktors,
2. zur Glättung von gleichgerichteten Wechselspannungen,

3. zur Speicherung von Ladungen,
4. in der HF-Technik als Schwingkreise.

9.3 Beispiel: Reihen- und Parallelschaltungen

Drei Kondensatoren mit Kapazitäten von 2, 4 und 6 μF sind in Reihe und parallel geschaltet. Berechnen Sie jeweils die Gesamtkapazität.

In Reihe:

$$\begin{aligned}\frac{1}{C_G} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{2\mu\text{F}} + \frac{1}{4\mu\text{F}} + \frac{1}{6\mu\text{F}} \\ &= 0,5\mu\text{F} + 0,25\mu\text{F} + 0,16\mu\text{F} = 0,916\text{ }1/\mu\text{F} \\ C_G &= 1,09\mu\text{F}\end{aligned}$$

Parallel:

$$C_G = C_1 + C_2 + C_3 = 12\text{ m}\mu\text{F}$$

9.4 Beispiel: Gemischte Schaltung

Berechnen Sie die Gesamtkapazität folgender Schaltung.

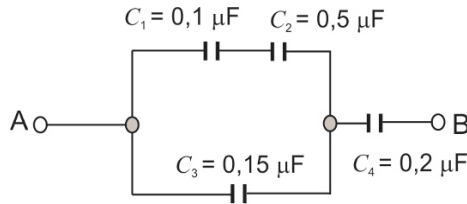


Bild 9.16: Gesamtkapazität

In Reihe und parallelgeschaltete Kondensatoren:

$$C_a = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + C_3 = \frac{0,1\mu\text{F} \cdot 0,5\mu\text{F}}{0,1\mu\text{F} + 0,5\mu\text{F}} + 0,15\mu\text{F} = 0,233\mu\text{F}$$

Das wird zum C_4 in Reihe geschaltet.

$$C_b = \frac{C_a \cdot C_4}{C_a + C_4} = \frac{0,233\mu\text{F} \cdot 0,2\mu\text{F}}{0,233\mu\text{F} + 0,2\mu\text{F}} = 0,107\mu\text{F}$$



10 Elektromagnetische Felder

In diesem Kapitel werden folgende Themen behandelt [3], [5], [7]:

1. die Induktionsspannung,
2. die Spannungs- und Stromverläufe,
3. einfache Ersatzschaltbilder,
4. die Magnetfelder und Kräfte,
5. die Feldgrößen wie Feldstärke, Fluss und Flussdichte,
6. die Materialeigenschaften und
7. die magnetische Kreise.

Die große praktische Bedeutung des magnetischen Feldes beruht darauf, dass sich mit geringem Energieaufwand (Erregeraufwand) äußerst intensive Felder erzeugen lassen, die eine wirtschaftliche Energieumwandlung elektrischer Energie in mechanische und umgekehrt ermöglichen. So kann man sich heute die großen Generatoren und Motoren der Energietechnik nur auf Basis des magnetischen Feldes vorstellen. Energieumformer, die das elektrostatische Feld nutzen, haben nur für Sonderfälle in der Laboranwendung Bedeutung. Die Grundgesetze, nach denen Energieumwandlungen im magnetischen Feld ablaufen, sind das Induktionsgesetz, maßgebend für die Erzeugung von elektrischen Spannungen, und die die Kraftwirkung beschreibenden Gesetze, abgeleitet aus der Lorentz-Kraft und dem Energieerhaltungssatz für Feldanordnungen.

10.1 Stationäres magnetisches Feld

Magnetische Erscheinungen sind schon seit dem Altertum bekannt. Thales von Milet (624-546 v. Chr.) beschreibt solche Erscheinungen, die von **Steinen** ausgehen, die bei dem Ort Magnesia in Kleinasien (Türkei) gefunden wurden. In China, wo die magnetischen Eigenschaften des Eisens möglicherweise schon im 2. Jh. v. Chr. bekannt waren, wurde auch die Richtwirkung der Magnetenadel - dort

”Südweiser” genannt - entdeckt (erstmal im 12. Jh. n. Chr. erwähnt). Vermutlich durch Araber kam der Magnetkompass im 12./13. Jh. nach Europa; seine heutige Form erhielt er im 13. Jh. von italienischen Seefahrern.

Der dänische Physiker Hans Christian Oerstedt (1777-1851) entdeckte 1820 die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes. Bei Experimenten mit dem magnetischen Feld kann man folgende Phänomene beobachten (**Bild 10.1**):

1. Fließt in einem Leiter ein Strom I , so wird in seiner Umgebung eine Kraft auf magnetische Körper ausgeübt.
2. Fließt in einem Leiter ein Strom I , so wird in seiner Umgebung eine Kraft auf bewegte elektrische Teilchen - damit z.B. auch auf einen anderen stromführenden Leiter - ausgeübt.

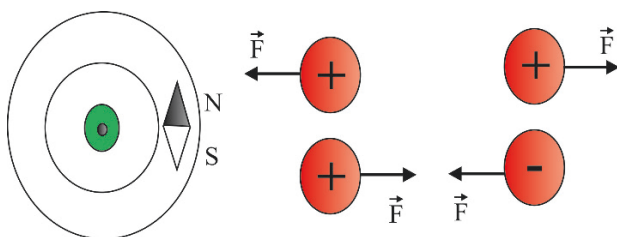


Bild 10.1: Magnetische Wirkungen

Was macht ein magnetisches Feld?

Ein magnetisches Feld erzeugt eine Kraft.

Ein Magnetfeld ist die Voraussetzung für die Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische und umgekehrt. Neben dem Motor wird dieses Prinzip auch beim Relais angewandt. Beim Transformator wird ein veränderliches Magnetfeld zur Transformation von Wechselspannungen und -strömen benötigt. Beispiele von magnetischen Feldern sind im **Bild 10.2** gezeigt.

Aus diesen Erscheinungen ergibt sich folgende logische Kette:

- Ladungen erzeugen elektrische Felder.
- Durch elektrische Felder entstehen Kraftwirkungen auf Ladungen.
- Ladungen werden durch die Kraftwirkungen bewegt und bilden den elektrischen Strom.
- Der elektrische Strom erzeugt ein Magnetfeld.
- Das Magnetfeld bewirkt Kraftwirkungen auf bewegte Ladungen.

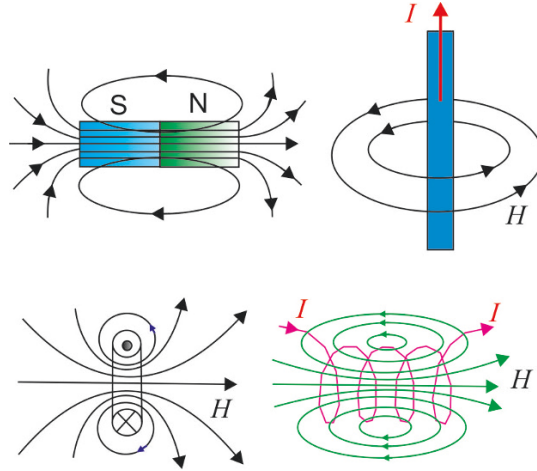


Bild 10.2: Beispiele von magnetischen Feldern

Zusammenfassung:

- Es gibt keine magnetischen Ladungen.
- Das magnetische Feld ist quellenfrei.
- Magnetische Feldlinien sind stets in sich geschlossen.
- Das magnetische Feld ist ein quellenfreies Wirbelfeld.

Zur Beschreibung der magnetischen Erscheinungen werden magnetische Feldgrößen eingeführt. Die Wirkung des magnetischen Feldes wird durch die magnetische Flussdichte B beschrieben. Damit entspricht die magnetische Flussdichte B nach ihrer Definition der elektrischen Feldstärke E im Bereich des elektrischen Feldes.

10.2 Kraftwirkungen im elektromagnetischen Feld

Ein stromdurchflossener Leiter erfährt im magnetischen Feld eine Kraftwirkung. Sie kann durch die auf die fließenden Elektronen wirkende **Lorentzkraft** erklärt werden. Für ein Elektron, das sich mit der Geschwindigkeit v senkrecht zu einem Magnetfeld bewegt, gilt für die ablenkende Kraft $F = e \cdot v \cdot B$. Die auf den Leiter wirkende Kraft ist dann gleich der Summe aller Lorentzkräfte. Der Leiter wird aus dem Gebiet der Feldlinienverdichtung hinausgedrängt (**Bild 10.3**).

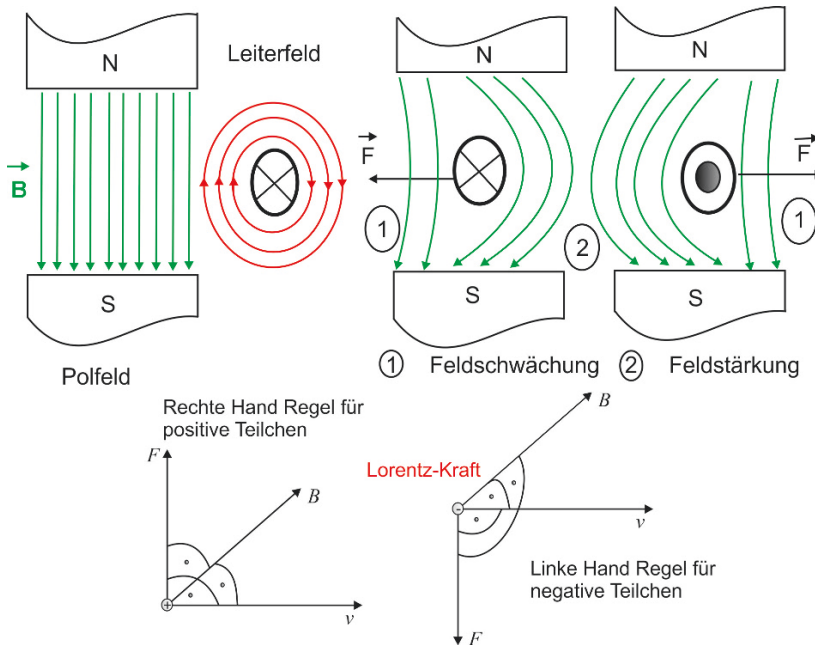


Bild 10.3: Kraftwirkungen im elektromagnetischen Feld

Stehen das Magnetfeld und der stromdurchflossener Leiter senkrecht aufeinander, so gilt:

$$F = I \cdot l \cdot B \quad (10.1)$$

Die Kraft ist dann proportional zum Leiterstrom, zur im Magnetfeld wirksamen Leiterlänge und zur Induktion.

Die Einheit der Kraft ergibt sich aus: $[F] = \text{A} \cdot \text{m} \cdot \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = \text{N}$

10.3 Beispiel: Kräfte im magnetischen Feld

Zwei im Abstand von 2 m parallel verlaufende Leiter der Länge 5 m werden beide vom Strom der Stärke 45 kA in gleicher Richtung durchflossen.

Es soll die Kraft berechnet werden, die auf die beiden Leiter wirkt

$$F = k_2 \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{d} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \cdot \frac{45 \text{ kA} \cdot 45 \text{ kA} \cdot 5 \text{ m}}{2 \text{ m}} = 1012,5 \text{ N}$$

10.5 Magnetische Feldgrößen

Zur Beschreibung der magnetischen Erscheinungen werden magnetische Feldgrößen eingeführt. Die Wirkung des magnetischen Feldes wird durch die magnetische Flussdichte B beschrieben. Damit entspricht die magnetische Flussdichte B nach ihrer Definition der elektrischen Feldstärke E im Bereich des elektrischen Feldes.

10.5.1 Magnetische Feldstärke H

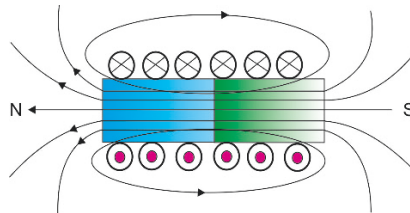


Bild 10.6: Magnetische Feldstärke

Die Ursache des magnetischen Feldes ist der elektrische Strom. Zur Beschreibung der Ursache des Magnetfeldes wird das Vektorfeld der magnetischen Erregung H eingeführt (**Bild 10.6**). Damit entspricht die magnetische Erregung H nach ihrer Definition der elektrischen Verschiebungsflussdichte D im Bereich des elektrischen Feldes (für D ist teilweise auch noch die Bezeichnung elektrische Erregung gebräuchlich).

$$H = \frac{\Theta}{l} \quad (10.2)$$

Die Einheit der magnetischen Feldstärke ist:

$$[H] = \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

10.5.2 Magnetische Flussdichte B

Die magnetische Flussdichte kann als die im magnetischen Feld herrschende Feldliniendichte beschrieben werden (**Bild 10.7**). Die Dichte der Feldlinien ist ein Maß für die Kraftwirkung des magnetischen Feldes. Für 50-Hz-Netze ist der Grenzwert $100\mu\text{T}$.

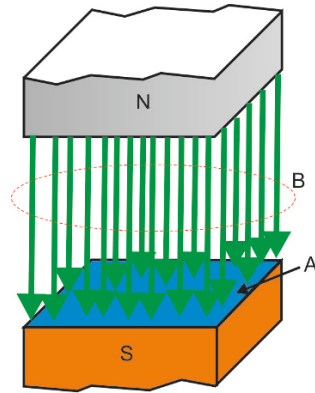


Bild 10.7: Magnetische Größen Flussdichte und Fluss

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (10.3)$$

Wobei die Permeabilitätskonstante:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$

und relative Permeabilität z.B. in Luft

$$\mu_r = 1$$

Die Einheit der magnetischen Flussdichte ist:

$$[B] = \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = \text{T (Tesla)}$$

10.5.3 Magnetischer Fluss Φ

In einem homogenen Magnetfeld mit der Fläche A, die von den Feldlinien senkrecht durchsetzt wird, bezeichnet man die Gesamtzahl der magnetischen Feldlinien durch die Fläche A als magnetischen Fluss (**Bild 10.7**)

$$\Phi = B \cdot A \quad (10.4)$$

Die Einheit des magnetischen Flusses ist:

$$[\Phi] = \frac{\text{T}}{\text{m}^2} = \text{Vs}$$

10.5.4 Durchflutungsgesetz

Der magnetische Fluss wird durch den Strom verursacht. Es ist gleichgültig, ob der Strom durch eine Windung oder durch mehrere Windungen fließt. Daraus folgt, dass die magnetische Wirkung proportional zum Strom I und zur Windungszahl N ist. Das Produkt $\Theta = I \cdot N$ nennt man magnetische Durchflutung. Umlaufsinn und Normalvektor der Fläche im Rechtschraubensinn, Ströme in Richtung des Normalvektors sind positiv. Bei diesem und jedem anderen geschlossenen Umlauf liefert das Umlaufintegral mit der Kurve **C** (**Bild 10.8**):

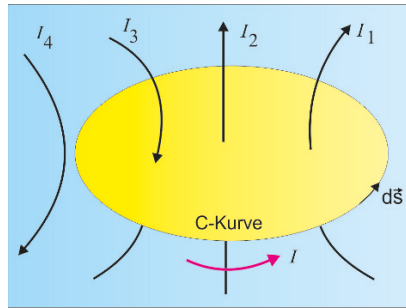


Bild 10.8: Durchflutung

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = \mu \cdot \Sigma I_i = \mu \cdot (I_1 + I_2 - I_3 - I_4) \quad (10.5)$$

Die Summe sämtlicher eine Fläche durchsetzender Ströme wird als Durchflutung Θ (Theta) bezeichnet. Die Summe aller Wirkungen (B) auf dem Umlauf der Summe aller Ursachen (I) innerhalb der vom Umlauf erfassten Fläche.

$$\Theta = \Sigma_i I_i \quad (10.6)$$

$$\Theta = N \cdot I \quad (10.7)$$

Die Einheit der magnetischen Durchflutung ist:

$$\Theta = A$$

$$\Theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{s} \quad (10.8)$$

Vielfach trifft man auf dem Integrationsweg $d\vec{s}$ unterschiedliche Materialien an verschiedene μ_r , dabei muss die Permeabilität $\mu = f(s)$ mit in das Integral gezogen werden.

$$\oint \frac{\vec{B} \cdot d\vec{s}}{\mu(s)} = \Theta \iff \oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \Theta \quad (10.9)$$

Die magnetische Feldstärke H [A/m] lässt sich im Gegensatz zur magnetischen Flussdichte B nicht direkt messen. Da sie jedoch nur mit den Strömen und dem Integrationsweg verknüpft ist, ist sie wichtig für Feldberechnungen.

Zusammenfassung:

1) Durchflutungsgesetz:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \Theta \quad (10.10)$$

2) Elektrische Spannung:

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{s} = U \quad (10.11)$$

3) Elektrische Teilspannungen:

$$\int_1^2 \vec{H} \cdot d\vec{s} = V_{12} \quad (10.12)$$

10.5.5 Magnetischer Kreis

Den magnetischen Kreis kann man mit dem elektrischen Kreis vergleichen. Die Spannung treibt den Strom durch den Widerstand $U = R \cdot I$. Beim magnetischen Kreis bleiben die magnetischen Feldlinien im Material (**Bild 10.9**). Entsprechend schreibt man für die Durchflutung

$$\Theta = \Phi \cdot R_m \quad (10.13)$$

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = B \cdot A = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{A}{l_m} \quad (10.14)$$

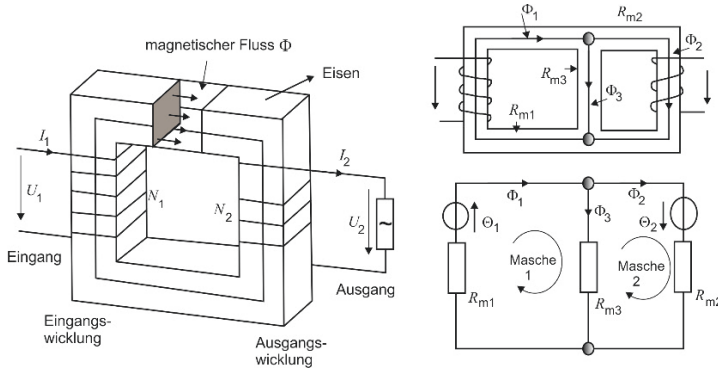


Bild 10.9: Magnetischer Kreis

Das Ohmsche Gesetz des magnetischen Kreises Λ ist analog zu

$$I = U \cdot G$$

$$\Phi = \Theta \cdot \Lambda \quad (10.15)$$

Seine Einheit ist:

$$[\Lambda] = \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{m}^2 = \frac{\text{Vs}}{\text{A}}$$

Mit

$$\Lambda = \frac{1}{R_m} \quad (10.16)$$

Die Summe aller magnetischen Spannungsfälle in einem geschlossenen magnetischen Kreis in Analogie zum elektrischen Stromkreis ist gleich der vom Strom eingebrachten Durchflutung. Damit kann man bei der Berechnung das Ohmsche Gesetz und die Kirchhoffschen Gleichungen anwenden.

Beispiel: Berechnung von magnetischen Kreisen

Die Querschnittsfläche des Eisenkerns beträgt $A = 10 \text{ cm}^2$, seine Länge ($l_{\text{FE}} = 100 \text{ cm}$), die Länge des Luftspaltes ($l_{\text{Luft}} = 1 \text{ mm}$), die Permeabilitätszahl des Eisens ($\mu_{\text{r,FE}} = 1000$), während die Permeabilitätszahl von Luft als ($\mu_{\text{r,Luft}} = 1$) angesehen werden kann. Wie groß ist dann der magnetische Gesamtwiderstand?

Da sich der magnetische Gesamtwiderstand aus dem magnetischen Widerstand des Eisenkerns und dem des Luftspaltes (in Reihenschaltung) zusammensetzt, gilt:

$$R_{m,ges} = R_{m,Luft} + R_{m,Fe} = \frac{l_{Luft}}{\mu_0 \cdot \mu_{r,Luft} \cdot A} + \frac{l_{Fe}}{\mu_0 \cdot \mu_{r,Fe} \cdot A}$$

Wenn man die Zahlen einsetzt, erhält man:

$$R_{m,ges} = 80,3 \cdot 1032 \frac{A}{Vs}$$

10.6 Magnetische Eigenschaften der Materie

Manche Stoffe haben eine große Wirkung auf das Magnetfeld, andere Stoffe wiederum nicht. Das Verhalten dieser Werkstoffe ist daher beim Aufbau von elektrischen Maschinen sehr wichtig. Der Strom induziert einen magnetischen Fluss. Diese Induktion kann vergrößert werden, wenn Eisen in die Spule gebracht wird. Die Verstärkung wird als Permeabilitätszahl μ_r genannt. Es gilt:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (10.17)$$

Die magnetische Feldkonstante ist mit $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$ und μ_r direkt vom Werkstoff abhängig. Wird ein Eisenkern erstmalig in einer Ringspule bis in die Sättigung magnetisiert, und dann der Erregerstrom abgeschaltet, verschwindet die magnetische Feldstärke H , aber im Ringkern bleibt eine Remanenzflussdichte B_r . Es stellt sich nicht wieder von selbst eine statistische Verteilung der Weißschen Bezirke ein. Dazu muss Energie zugeführt werden. Die Entmagnetisierung kann z.B. durch ein Magnetfeld erfolgen, das in Gegenrichtung zu dem vorher angelegten steht. Bei der Koerzitivfeldstärke $-H_c$ verschwindet die Flussdichte im Ringkern. Es ist also $B = 0$. Wird die Ringspule von einem Wechselstrom durchflossen, durchläuft die Magnetisierung des Eisenkerns die obige Hystereseschleife (**Bild 10.10**).

10.6.1 Wirkung des Ferromagnetismus

Die ferromagnetischen Stoffe (z.B. Eisen-Fe) haben eine große technische Bedeutung, da sie eine verstärkende Wirkung auf das Magnetfeld haben. Die Permeabilitätszahl ist $\mu_r \gg 1$ und beträgt wie z.B.: Eisen, unlegiert $\mu_r >$ bis 6000, bei Elektroblech $\mu_r > 6500$. Ferromagnetische Werkstoffe zeigen die Erscheinung der Hysterese (**Bild 10.11**).

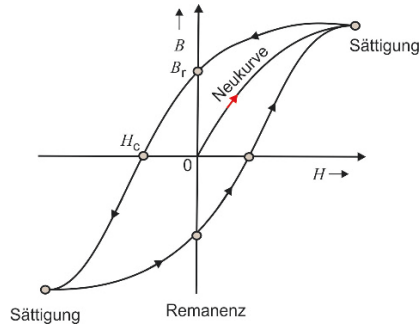


Bild 10.10: Darstellung der Neukurve

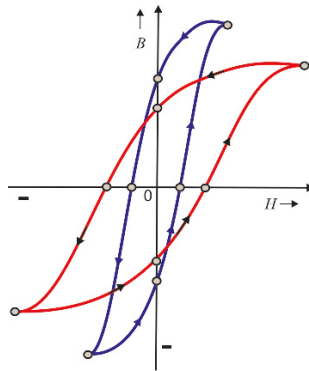


Bild 10.11: Hystereseverhalten ferromagnetischer Werkstoffe

10.6.2 Wirkung des paramagnetischen Stoffes

Paramagnetischer Stoff (z.B. Aluminium-Al) hat ungeordnete magnetische Dipole. Der Stoff zeigt keine magnetische Wirkung. Unter dem Einfluss eines magnetischen Feldes werden die Dipole in Richtung des Feldes ausgerichtet. Dadurch entsteht eine schwache Verstärkung des magnetischen Feldes. (Hier dargestellt durch geringere Abstände der Feldlinien.) Die Permeabilitätszahl μ_r von paramagnetischen Stoffen ist etwas größer als 1.

10.6.3 Wirkung des Diamagnetismus

Zwei übereinanderliegende Kreisbahnen entgegengesetzt umlaufender Elektronen (Kreisströme) erzeugen sich aufhebende Magnetfelder bzw. zwei entgegengesetzt gleich große magnetische Momente. Diamagnetische Stoffe (z.B. Kupfer-Cu) haben die Permeabilitätszahl $\mu_r < 1$.

11 Veränderliche magnetische Felder

In diesem Kapitel werden folgende Themen behandelt [3]:

1. das Induktionsgesetz,
2. die Induktivität und Selbstinduktion,
3. einfache Schaltungen von Induktivitäten und
4. die Auf- und Entladevorgänge.

Fließt in einem Leiter ein zeitlich konstanter Strom I , und wird eine geschlossene Leiterschleife in die Nähe des stromführenden Leiters gebracht, so fließt während der Bewegung der Leiterschleife in dieser ein Strom. Dieser Strom wird in der Leiterschleife induziert.

11.1 Das Induktionsgesetz

Die Grundlage zur Spannungserzeugung ist das Induktionsgesetz. Der Strom und das magnetische Feld sind untrennbar miteinander verbunden. Um eine Spannung zu erzeugen wird entweder das Magnetfeld verändert oder die Ladung verschoben. An den Enden einer Spule wird eine Spannung gemessen, wenn der Magnet in der Spule hin und her bewegt wird und sich der magnetische Fluss ändert (**Bild 11.1**).

Durch die Bewegung eines Leiters in einem magnetischen Feld mit der Flussdichte B wird in dem Leiter ein elektrisches Feld $E_{ind} = v \cdot B$ induziert (**Bild 11.2**)

Die in einer Leiterschleife induzierte Spannung ist gleich der Änderung des mit der Leiterschleife verketteten magnetischen Flusses pro Zeiteinheit.

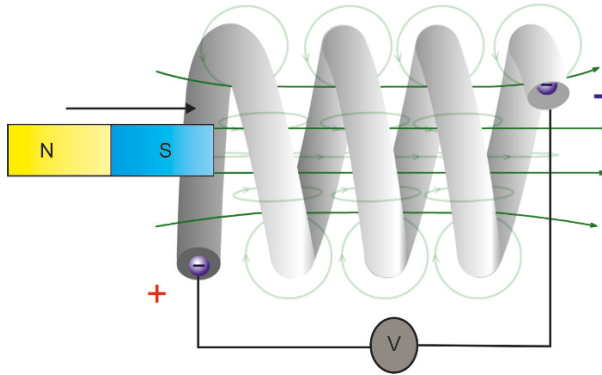


Bild 11.1: Spannungserzeugung

$$u_i = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (11.1)$$

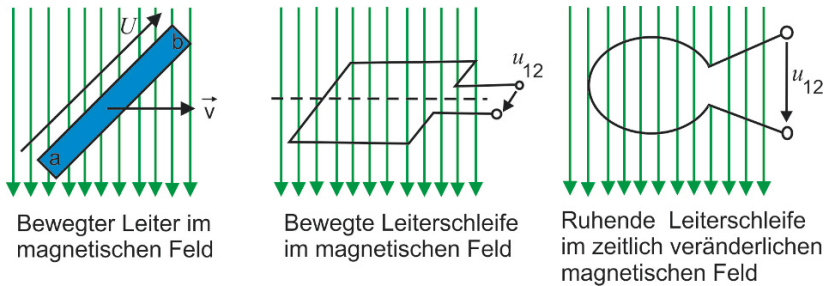


Bild 11.2: Nachweis von Induktionswirkungen

Induktionserscheinungen:

Wir unterscheiden nach Art der Änderung des verketteten Flusses:

1. Ruheinduktion: Magnetfeld ändert seine Größe und/oder seine Richtung als Funktion der Zeit, Induktionsweg und Magnetfeld befinden sich relativ zueinander in Ruhe (z.B. Transformator).
2. Bewegungsinduktion: Magnetfeld ändert seine Größe und/oder seine Richtung als Funktion der Zeit nicht, Induktionsweg und Magnetfeld bewegen sich relativ zueinander (z.B. Generator und Motor).

Wir unterscheiden nach Ort der Ursache (Entstehung des Magnetfeldes) und der Wirkung (induzierte Spannung):

1. Selbstinduktion: Die induzierte Spannung entsteht in der gleichen Schleife, in der der Strom fließt, der das Magnetfeld verursacht.

2. Gegeninduktion: Die induzierte Spannung entsteht nicht in der gleichen Schleife, in der der Strom fließt, der das Magnetfeld verursacht.

11.1.1 Rotatorische Induktion

Bei der rotatorischen Induktion rotiert eine Spule in einem Magnetfeld oder es verändert sich das Magnetfeld in einer feststehenden Spule. Die Voraussetzungen sind: $B = \text{constant}$, A ändert sich, drehbare Leiterschleife im homogenen Magnetfeld (**Bild 11.3**).

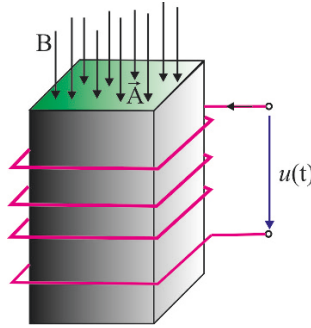


Bild 11.3: Rotatorische Induktion

Die im Magnetfeld wirksame Fläche ist abhängig vom Winkel φ .

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A}, \quad \hat{A}(\varphi) = \hat{A} \cdot \cos\varphi \quad (11.2)$$

$$\Phi = B \cdot \hat{A} \cdot \cos\varphi = B \cdot \hat{A} \cdot \cos(\omega t) \quad (11.3)$$

$$u(t) = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = +N \cdot B \cdot \hat{A} \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t) \quad (11.4)$$

11.1.2 Transformatorische Induktion

Bei der transformatorischen Induktion wird in einer Spule der magnetische Fluss verändert ($d\Phi/dt$). Die Voraussetzungen sind: $A = \text{constant}$, B ändert sich, ruhende Leiterschleife im zeitlich veränderlichen Magnetfeld (**Bild 11.4**).

$$u(t) = -N \cdot \hat{\Phi} \cdot \frac{d\sin(\omega t)}{dt} = -N \cdot \hat{\Phi} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) = -\hat{u} \cdot \cos(\omega t) \quad (11.5)$$

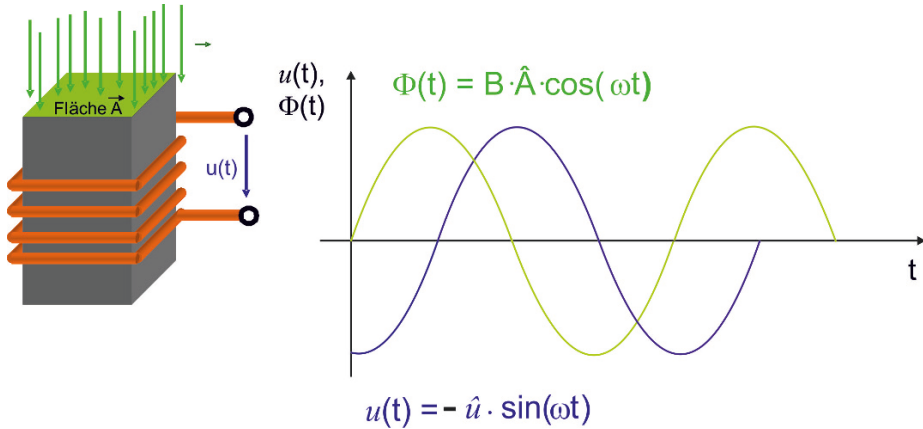


Bild 11.4: Transformatorische Induktion

Wechselspannungen und Wechselströme können durch Anwenden des Induktionsgesetzes transformiert werden.

11.1.3 Lenzsche Regel

Die angelegte Spannung induziert einen Strom, der ein Magnetfeld aufbaut $B_{ind.}$. Die Zunahme des Flusses ($\frac{d\Phi}{dt} > 0 \Rightarrow i > 0$) führt zu einem Magnetfeld, das dem eigentlichen Magnetfeld entgegengerichtet ist. Eine Abnahme ($\frac{d\Phi}{dt} < 0 \Rightarrow i < 0$) des Flusses bewirkt die gleiche Richtung (**Bild 11.5**). Daraus folgt, dass der induzierte Strom i immer der ihn hervorruftenden Flussänderung entgegen wirkt.

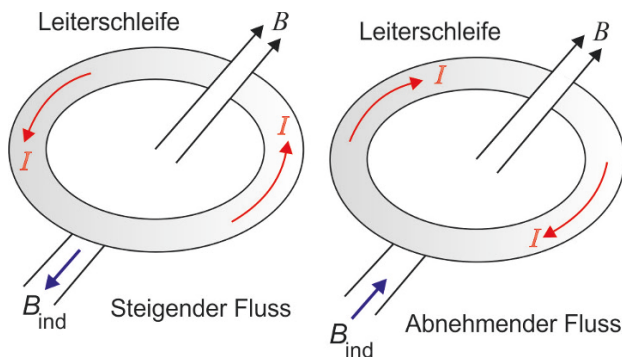


Bild 11.5: Lenzsche Regel

11.2 Induktivität und Selbstinduktion

Die Induktivität ist die Fähigkeit einer Spule, bei Stromänderungen eine Selbstinduktion zu erzeugen. Betrachtet wird eine widerstandslose Leiterschleife, in die ein zeitlich veränderlicher Strom $i(t)$ eingeprägt wird (**Bild 11.6**).

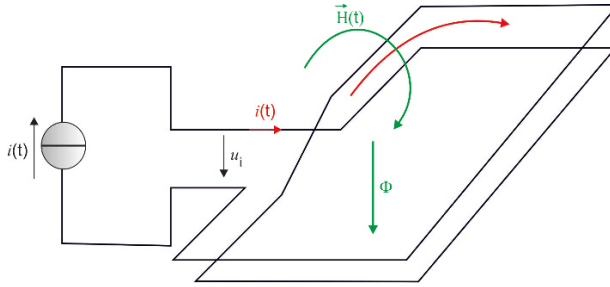


Bild 11.6: Induktivität und Selbstinduktion

$$u_i(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} = N^2 \cdot \Lambda \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (11.6)$$

$$u_i(t) = -L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (11.7)$$

$$L = N^2 \cdot \Lambda = N^2 \cdot \frac{\Phi}{\Theta} \quad (11.8)$$

L ist die Selbstinduktivität der Spule, sie ist abhängig von der Geometrie der Spule und dem magnetischen Werkstoff in der Spulenfläche.

Die Induktivität L einer Spule ist proportional zum Quadrat der Windungszahl N und dem magnetischen Leitwert Λ des vom Spulenfluss durchsetzten Mediums.

Die Induktivität L ist analog zur Kapazität C im elektrischen Feld eine integrale Größe des magnetischen Feldes.

11.3 Gegeninduktivität und Gegeninduktion

Die Gegeninduktion wird am Beispiel eines Wechselstromtransformators mit N -Windungen an der Primär- und Sekundärseite dargestellt (**Bild 11.7**). Die Stromänderung in Spule 1 bewirkt eine induzierte Spannung in Spule 2 (**Bild 11.8**).

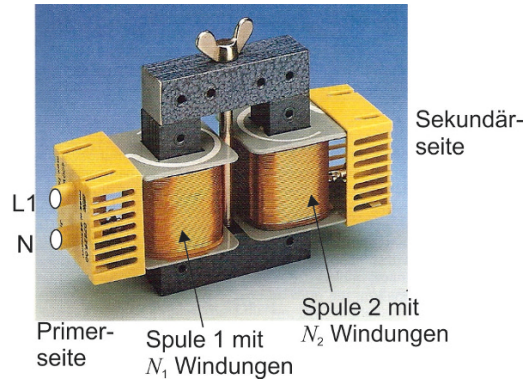


Bild 11.7: Gegeninduktivität und Gegeninduktion

Damit lassen sich die abgeleiteten Gleichungen auch auf Systeme mit beliebiger Kopplung verallgemeinern.

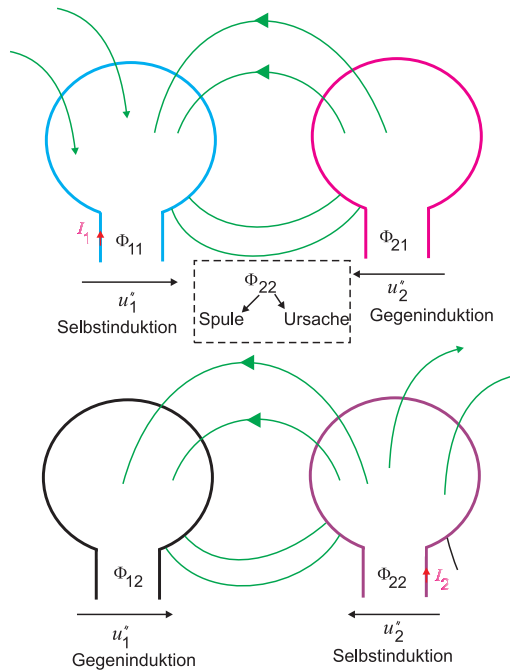


Bild 11.8: Gegeninduktivität und Gegeninduktion

$$u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (11.9)$$

$$u_2 = M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (11.10)$$

Die Gegeninduktivität ist zwischen Stromkreisen immer vorhanden. Eine feste Flussverkopplung ist gewünscht, Streuung unerwünscht (z.B. bei Motoren und Transformatoren) (**Bild 18.10**). Unerwünscht und störend die Flusskopplung bei Signalleitungen.

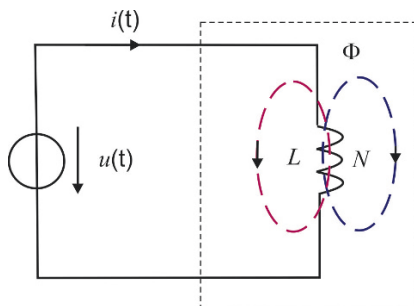


Bild 11.9: Spule mit N Windungen

Wir betrachten zuerst eine Spule mit N Windungen, um die Selbst- und Gegeninduktion beschreiben zu können (**Bild 18.10**). Der Strom erzeugt in einer Spule einen magnetischen Fluss Φ .

Die induzierte Spannung beträgt

$$u_i = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (11.11)$$

Jede Änderung im Fluss Φ bedeutet eine Änderung im Strom i . Wird Gleichung 11.11 mit $\frac{di}{dt}$ erweitert, können wir schreiben:

$$u_i = N \cdot \frac{d\Phi}{di} \frac{di}{dt} \quad (11.12)$$

oder mit

$$L = N \cdot \frac{d\Phi}{di} \quad (11.13)$$

$$u = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (11.14)$$

L wird Selbstinduktion genannt. Es gilt:

$$L = N \cdot \frac{d\Phi}{di} \quad (11.15)$$

Wir nehmen jetzt zwei magnetisch entkoppelte Spulen mit unterschiedlichen Windungen und schalten den Stromkreis an die Eingangsspannung u_1 (**Bild 11.10**).

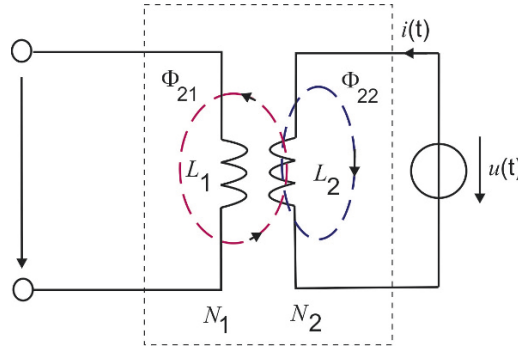


Bild 11.10: Induktivität und Selbstinduktion

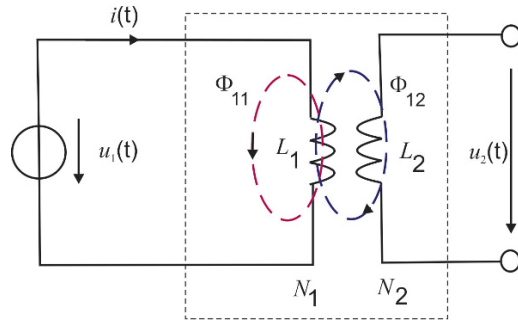


Bild 11.11: Induktivität und Selbstinduktion

Der Fluss beträgt $\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{12}$. Die induzierten Spannungen am Eingang und am Ausgang sind

$$u_1 = N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} \quad (11.16)$$

$$u_2 = N_2 \cdot \frac{d\Phi_{12}}{dt} \quad (11.17)$$

Wie oben dargestellt, betrachten wir die Spannungen und die magnetische Kopplung durch

$$u_1 = N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{di_1} \frac{di_1}{dt} = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (11.18)$$

$$u_2 = N_2 \cdot \frac{d\Phi_{12}}{di_1} \frac{di_1}{dt} = M_{21} \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (11.19)$$

Die magnetische Kopplung ist

$$M_{21} = N_2 \cdot \frac{d\Phi_{12}}{di_1} \quad (11.20)$$

Die induzierte Spannung in der Spule

$$u_2 = M_{21} \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (11.21)$$

Der Ausgang wird nun an die Spannung u_2 angeschlossen. Die Eingangsseite bleibt offen.

Der Fluss beträgt $\Phi_2 = \Phi_{21} + \Phi_{22}$. Die induzierten Spannungen am Eingang und am Ausgang sind

$$u_2 = N_2 \cdot \frac{d\Phi_2}{dt} = N_2 \cdot \frac{d\Phi_2}{di_2} \cdot \frac{di_2}{dt} = L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (11.22)$$

Wie oben dargestellt, betrachten wir die Spannungen und die magnetische Kopplung durch

$$u_1 = N_1 \cdot \frac{d\Phi_{21}}{dt} = N_1 \cdot \frac{d\Phi_{21}}{di_2} \frac{di_2}{dt} = M_{12} \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (11.23)$$

Die magnetische Kopplung ist

$$M_{12} = N_1 \cdot \frac{d\Phi_{21}}{di_2} \quad (11.24)$$

Die induzierte Spannung in der Spule

$$u_1 = M_{12} \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (11.25)$$

Die magnetische Kopplung beträgt $M_{12} = M_{21} = M$

Die Gegeninduktion M nimmt immer positive Werte an, während die Gegeninduktivität $M \cdot \frac{di}{dt}$ negativ oder positiv sein kann. Die Vorzeichenwahl von $M \cdot \frac{di}{dt}$ wird durch Prüfen der Ausrichtung oder durch Anwenden der Lenzschen Regel in Verbindung mit der rechten Hand-Regel festgelegt. Beide Spulen sind physikalisch gewickelt und mit einem Punkt gekennzeichnet (**Bild 11.12**).

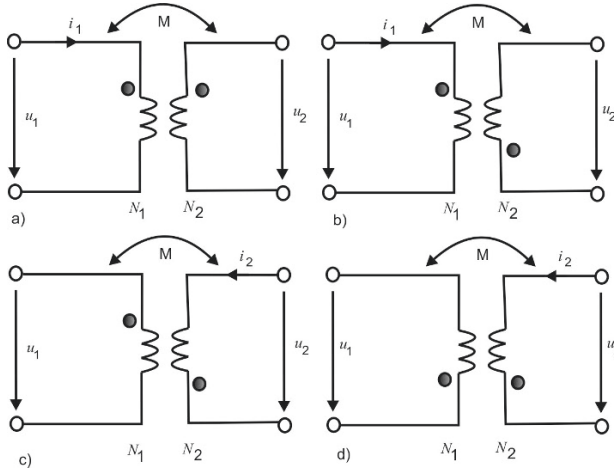


Bild 11.12: Induktivität und Selbstinduktion

Die Regel ist: Wenn ein Strom in den gepunkteten Anschluss einer Spule fließt, ist die Polarität der gegenseitigen Spannung in der zweiten Spule positiv.

Der Hauptfluss induziert aufgrund der gemeinsamen Erregung von i_1 und i_2 eine Spannung sowohl primär- als auch sekundärseitig. Auf beiden Seiten besteht die Spannung aus einer Selbst- und einer Gegeninduktionsspannung.

Für die Spulenspannungen ergeben sich somit folgende Gesetzmäßigkeiten:

$$u_1 = i_1 \cdot R_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (11.26)$$

$$u_2 = i_2 \cdot R_2 + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + M \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (11.27)$$

Im Frequenzbereich

$$\underline{U}_1 = I_1 \cdot (R_1 + j\omega L_1) + j\omega M \cdot I_2 \quad (11.28)$$

$$\underline{U}_2 = I_2 \cdot (R_2 + j\omega L_2) + j\omega M \cdot I_1 \quad (11.29)$$

11.4 Zusammenschaltung von Induktivitäten

Bei der Zusammenschaltung von Induktivitäten werden keine magnetischen Kopplungen und keine ohmschen Widerstände vorausgesetzt.

11.4.1 Reihenschaltung

Die Reihenschaltung von Induktivitäten wird in **Bild 11.13** gezeigt.

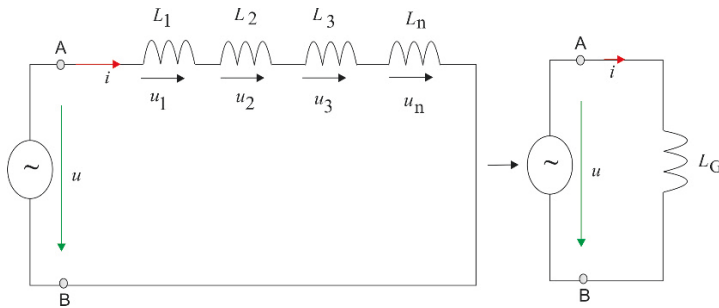


Bild 11.13: Reihenschaltung von Induktivitäten

$$u_{AB} = u_1 + u_2 + u_3 + \dots + u_n \quad (11.30)$$

$$u_{AB} = L_1 \cdot \frac{di}{dt} + L_2 \cdot \frac{di}{dt} + L_3 \cdot \frac{di}{dt} + \dots + L_n \cdot \frac{di}{dt} \quad (11.31)$$

$$u_{AB} = (L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n) \cdot \frac{di}{dt} = L_G \cdot \frac{di}{dt} \quad (11.32)$$

$$L_G = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n = \sum_i L_i \quad (11.33)$$

Der Gesamtwiderstand einer Reihenschaltung mehrerer Induktivitäten ist gleich der Summe der Einzelwiderstände.

11.4.2 Parallelschaltung

Die Parallelschaltung von Induktivitäten wird in **Bild 11.14** gezeigt.

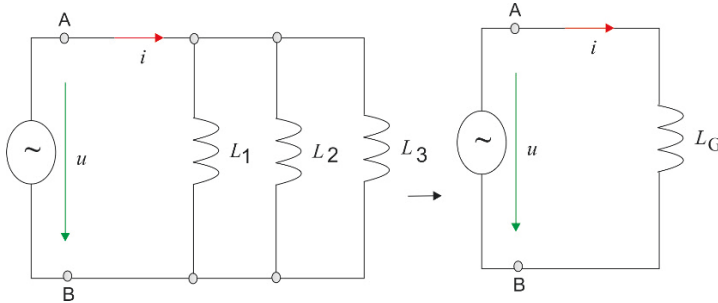


Bild 11.14: Parallelschaltung von Induktivitäten

$$u_{AB} = L \cdot \frac{di}{dt} \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} + \dots + \frac{di_n}{dt} \quad (11.34)$$

$$\frac{1}{L_G} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n} = \sum_i \frac{1}{L_i} \quad (11.35)$$

$$L_G = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} \quad (11.36)$$

Der Gesamtwiderstand einer Parallelschaltung mehrerer Induktivitäten ist gleich der reziproken Summe der Reziprokwerte der Einzelwiderstände.

11.5 Beispiele: Magnetische Felder

Beispiel: Reihen- und Parallelschaltung

Berechnen Sie die Gesamtinduktivität folgender Schaltung.

$$L_G = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} + L_3 = 0,511 \text{ H}$$

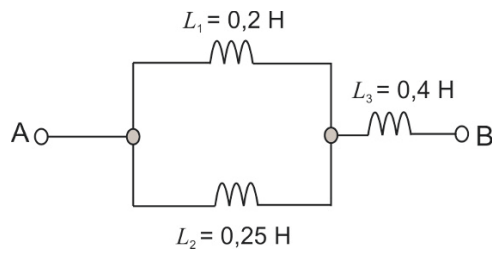


Bild 11.15: Schaltung mit Induktivitäten

11.6 Wirbelstrom und Skineffekt

11.6.1 Wirbelstrom

Durchsetzt ein sich zeitlich ändernder Fluss $\Phi(t)$ einen Leiter, so entstehen wegen des elektrischen Wirbelfeldes Wirbelströme (**Bild 11.16**). Wirbelströme verursachen Verluste und erwärmen die Metalle.

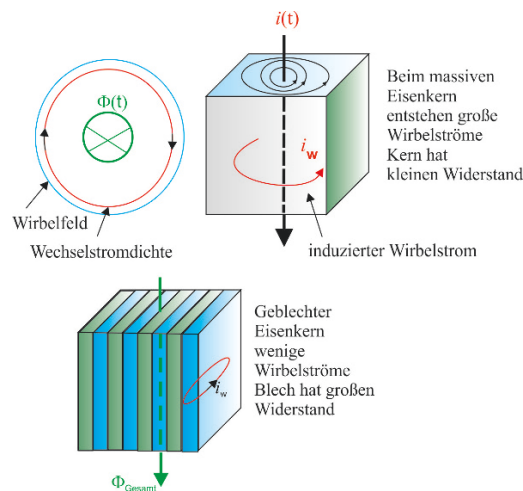


Bild 11.16: Wirbelstrom

11.6.2 Skineffekt

Die Wirbelströme setzen die Stromdichte im Leiterinneren herab und erhöhen sie am Rande des Leiters. Durch diese Stromverdrängung fließt der Strom bei höherer Frequenz nur noch in einer dünnen Schicht am Außenrand des Leiters, was als Skineffekt bezeichnet wird (**Bild 11.17**).

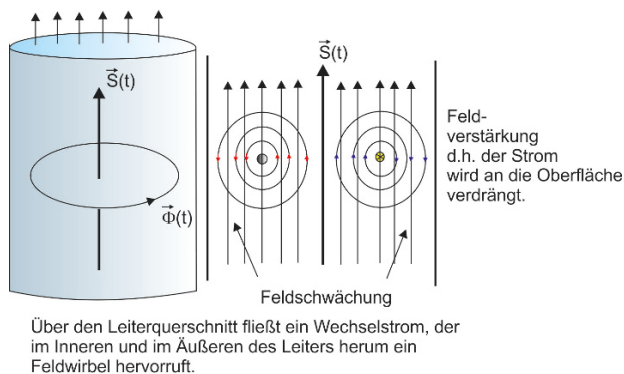


Bild 11.17: Skineffekt

11.7 Auf- und Entladevorgänge bei Induktivität

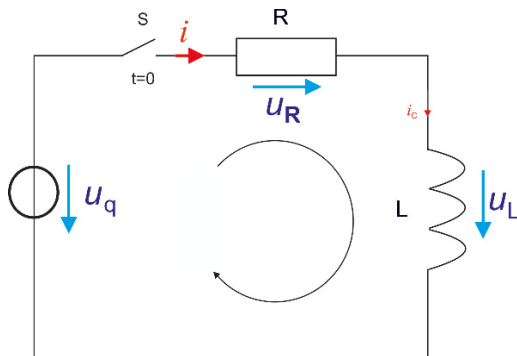


Bild 11.18: Auf- und Entladevorgänge bei Induktivität

Schaltet man eine Induktivität L in einen Stromkreis, so steigt der Strom nicht sofort an, sondern er erreicht mit einem exponentiellen Anstieg seinen Endwert (**Bild 11.18**).

Der Strom eilt der Spannung nach.

$$u_q = u_R + u_L \quad (11.37)$$

$$0 = i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt} - u_q \quad (11.38)$$

Lösung der Differentialgleichung beim Einschaltvorgang:

$$i(t) = I \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (11.39)$$

11.9 Anwendung von Spulen

Spulen werden in vielen Bereichen der Elektrotechnik eingesetzt wie z.B. bei

1. der Herstellung starker Magnetfelder,
2. Medizinischen Anwendungen (Kernspintomografie),
3. Elektrischen Maschinen (Motoren, Transformatoren, Generatoren),
4. Elektromagnetischen Schutz- und Schalteinrichtungen,
5. Lautsprechern.



12 Grundbegriffe der Wechselstromtechnik

In diesem Kapitel werden folgende Themen behandelt[3], [5]:

1. die Vorteile von Drehstromsystemen,
2. die Kenngrößen des Wechselstroms,
3. das komplexe Rechnen,
4. die Zeigerdiagramme von Wechselspannungen und -strömen,
5. die Berechnung von Stern- und Dreieckschaltungen,
6. elektrische Leistungen und
7. Wechselstromverbraucher.

Bei Gleichspannung und Gleichstrom sind Strom und Spannung konstant. Bei Wechselspannung und Wechselstrom sind Strom und Spannung zeitlich veränderliche, periodische Größen, die ständig ihre Richtung wechseln.

Wie können Wechselspannung und Wechselstrom erzeugt werden?

Wir haben gelernt, dass die Wechselspannung durch Induktion entsteht. An den Induktionsspulen eines Generators kommt abwechselnd ein Nord- und ein Südpol des Läufers vorbei. Dadurch ändert sich in jeder Spule fortwährend Stärke und Richtung des Magnetfeldes. Es entstehen Wechselspannung und Wechselstrom. An den Klemmen der feststehenden Ständerwicklung kann die Wechselspannung abgenommen werden. Wechselstrom und Wechselspannung sind zeitabhängige Vorgänge.

Sinusförmige Wechselspannung kann einfach aus mechanischer Rotationsbewegung durch Anwenden des Induktionsgesetzes erzeugt werden (**Bild 12.1**).

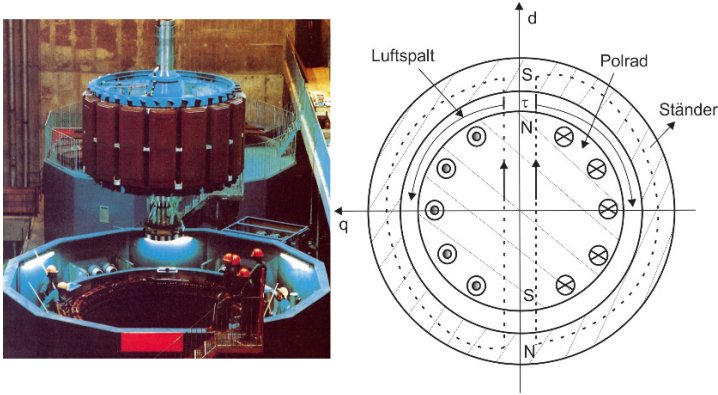


Bild 12.1: Erzeugung der Wechselspannung

12.1 Kenngrößen von Wechselstrom

Periodische sinusförmige Wechselgrößen können durch Periodendauer, Frequenz und Effektivwerte beschrieben und durch Linien- und Zeigerdiagramme dargestellt werden. Der zeitliche Verlauf $a(t)$ einer physikalischen Größe (Strom, Spannung) wird durch eine Sinus- oder Cosinusfunktion berechnet (**Bild 12.2**):

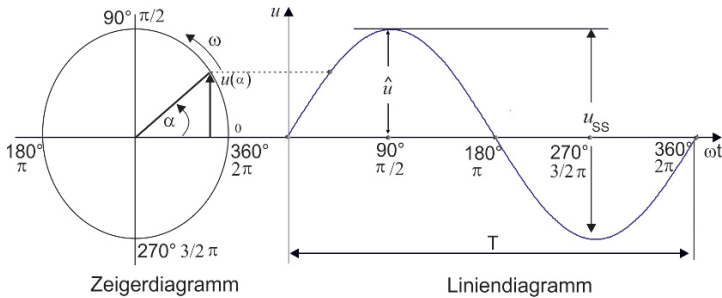


Bild 12.2: Kenngrößen von Wechselstrom

$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin \omega t \quad (12.1)$$

Ströme und Spannungen erzeugen in den Elementen elektrischer Netzwerke Wirkungen, z.B. die Erwärmung eines Widerstandes. Dabei sind die Mittelwerte von Energien und Leistungen wichtig, wenn etwa der Energiefluss berechnet werden soll.

Der Effektivwert (Quadratischer Mittelwert) (**Bild 12.3**):

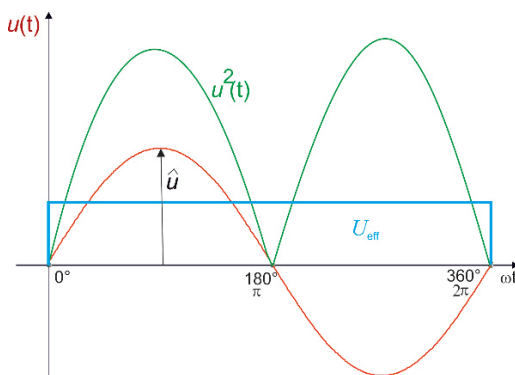


Bild 12.3: Effektivwert

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} u^2(t) \cdot dt} \quad (12.2)$$

In der technischen Wechselstromlehre wird mit Effektivwerten und Phasenbeziehungen gerechnet.

$$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \quad (12.3)$$

oder

$$I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} \quad (12.4)$$

damit die Leistung

$$P = U \cdot I \quad (12.5)$$

Die Zeit vom Nullpunkt bis zum ersten positiven Nulldurchgang der Zeitfunktion heißt Nullzeitpunkt t_0 , den zugehörigen Winkel nennt man Nullphasenwinkel φ_0 (**Bild 12.4**).

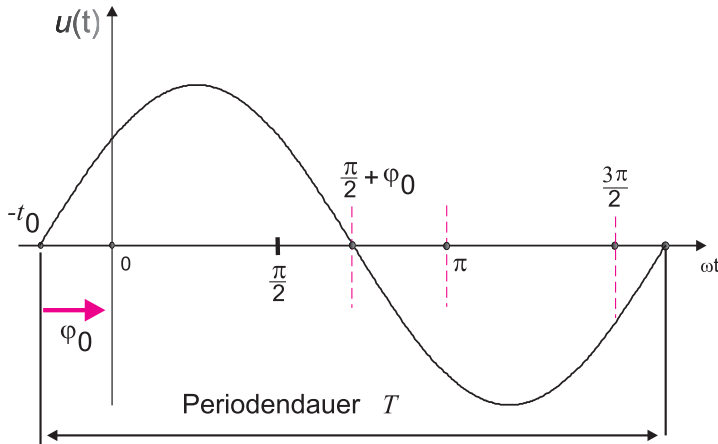


Bild 12.4: Nullphasenwinkel

$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (12.6)$$

Wobei:

$\hat{u}$	Scheitelwert oder Amplitude in V
T	Periodendauer in s
f	Frequenz in Hz ($1/T$)
φ_0	Nullphasenwinkel
ω	Kreisfrequenz in 1/s

Die Bedeutung der harmonischen Schwingungen (sinus- oder kosinusförmig) beruht auf folgenden Tatsachen:

- Die meisten Energieumformer (Generatoren) großer Leistung liefern sinusförmige Spannungen und Ströme.
- In der Informationstechnik lassen sich sinusförmige Größen relativ leicht unter Verwendung von Resonanzsystemen (Schwingkreisen) erzeugen und zur Informationsübertragung verwenden.
- Mathematisch kann jeder periodische nichtharmonische Vorgang durch harmonische Funktionen nachgebildet werden (Fourier-Analyse).

12.2 Einführung in das Rechnen mit komplexen Zahlen

12.2.1 Begriffe und Rechenregeln

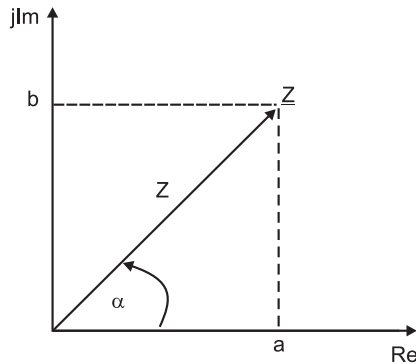


Bild 12.5: Darstellung komplexer Zahlen

Eine komplexe Zahl wird durch den Zeiger dargestellt (**Bild 12.5**). In Normalform (Komponentenform oder algebraische Form) schreibt man:

$$\underline{Z} = a + jb \quad (12.7)$$

Wobei a = Realteil, b = Imäginerteil und j = imaginäre Einheit ist.

$$|\underline{Z}| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (12.8)$$

$$a = Z \cdot \cos\alpha \quad (12.9)$$

$$b = Z \cdot \sin\alpha \quad (12.10)$$

In trigonometrischer Form:

$$\underline{Z} = Z \cdot \cos\alpha + jZ \cdot \sin\alpha = Z \cdot (\cos\alpha + jsin\alpha) \quad (12.11)$$

In Versorform:

$$\underline{Z} = Z \cdot \angle \arccos \alpha \quad (12.12)$$

In Exponentialform (Euler'sche Form):

$$\underline{Z} = Z \cdot e^{j\omega t} \quad (12.13)$$

Wobei $\alpha = \omega t + \varphi$ ist.

12.2.2 Rechenregeln für komplexe Zahlen

Um elektrische Schaltungen berechnen zu können, brauchen wir Rechenregeln für komplexe Zahlen, die wir hier wiederholen werden. Für Addition und Subtraktion muss die Komponentenform vorliegen. Bei den übrigen Rechenarten benutzt man die Exponentialform.

Addition und Subtraktion:

$$\underline{z}_1 \pm \underline{z}_2 = (a_1 + jb_1) \pm (a_2 + jb_2) = (a_1 \pm a_2) + j(b_1 \pm b_2) \quad (12.14)$$

Multiplikation:

$$\underline{z}_1 \cdot \underline{z}_2 = z_1 \cdot e^{j\varphi_1} \cdot z_2 \cdot e^{j\varphi_2} = z_1 \cdot z_2 \cdot e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)} \quad (12.15)$$

Division:

$$\frac{\underline{z}_1}{\underline{z}_2} = \frac{z_1 \cdot e^{j\varphi_1}}{z_2 \cdot e^{j\varphi_2}} = \frac{z_1}{z_2} \cdot e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (12.16)$$

Spezielle Werte:

$$j^0 = 1, \quad j^1 = j, \quad j^2 = -1, \quad j^3 = -j, \quad j^4 = 1$$

12.3 Komplexe Größen der Wechselstromtechnik

Die Mathematik des komplexen Rechnens kann man auf die Elektrotechnik übertragen (**Bild 12.6**). Mit Hilfe des komplexen Rechnens ist es möglich in der Wechsel- und Drehstromtechnik mit den gültigen Gesetzen wie dem Ohmschen Gesetz und den Kirchhofschen Regeln zu rechnen und nicht mit Additionstheoremen.

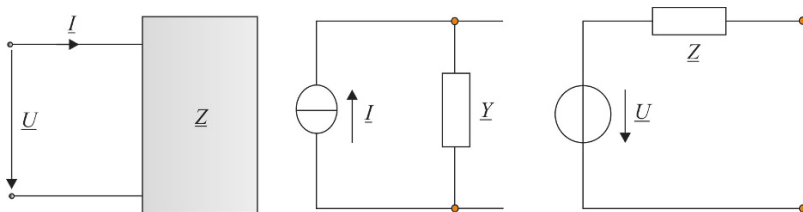


Bild 12.6: Darstellung elektrotechnischer Größen

$$\underline{Z} = \hat{u} \cdot (\cos\varphi + j\sin\varphi) = \hat{u} \cdot e^{j\varphi} \quad (12.17)$$

In dieser Gleichung steht $\underline{Z}$ für Zeiger und $\hat{u}$ für den Betrag des Zeigers (Scheitelwert $\hat{u}$ einer sinusförmigen Schwingung). Wir betrachten einen in der komplexen Zahlenebene mit der Winkelgeschwindigkeit ω umlaufenden Zeiger $\underline{Z}$ der Länge $\hat{u}$.

Vorteile der Zeigerdarstellung von Wechselspannungen und -strömen:

Mit diesen zeitlich unabhängigen komplexen Wechselgrößen wird gerechnet wie mit komplexen Zahlen:

1. numerisch mit Real- und Imaginärteil oder Betrag und Phasenlage und
2. graphisch mit Zeigerdiagrammen.

Als Phasenverschiebung bezeichnet man die Differenz der Nullphasenwinkel, wobei eine Größe als Bezugsgröße festgelegt wird. Der Phasenwinkel ist abhängig vom Schaltungsaufbau und der Frequenz.

Spannung und Strom können auch als komplexe Spannungs- bzw. Stromzeiger angegeben werden (**Bild 12.6**).

$$\underline{U} = U \cdot e^{j\varphi_u} \quad (12.18)$$

$$\underline{I} = I \cdot e^{j\varphi_i} \quad (12.19)$$

Das Ohmsche Gesetz wird für Wechselspannungen und -ströme erweitert. Während

uns bisher der Quotient U/I (hier Gleichspannung U und Gleichstrom I) den ohmschen Widerstand R liefert, erhalten wir aus dem komplexen Quotienten $\underline{U}/\underline{I}$ die komplexe Impedanz $\underline{Z}$.

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U}{I} \cdot e^{(\varphi_u - \varphi_i)} \quad (12.20)$$

Die Impedanz lässt sich natürlich auch wieder in Real- und Imaginärteil zerlegen:

$$\underline{Z} = R + jX \quad (12.21)$$

wobei R Wirkwiderstand (Resistanz) und X Blindwiderstand (Reaktanz) ist.

Mit $Z = \frac{1}{Y}$ ist.

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = G + jB \quad (12.22)$$

wobei G Wirkleitwert (Konduktanz) und B Blindleitwert (Suszeptanz) ist.

12.4 Einfache Sinusstromkreise

Wir hatten für Gleichstromkreise die Grundsaltungen und Bauelemente besprochen und berechnet. In diesem Abschnitt werden die Grundsaltungen von Sinusstromkreisen (Wechselstromkreisen) diskutiert. Die Grundbauelemente wie Widerstände, Induktivitäten und Kondensatoren werden an Wechselspannungsquellen angeschlossen und die zwischen Strom und Spannung bestehenden Abhängigkeiten dargestellt.

12.4.1 Wechselspannung und -strom am Ohmschen Widerstand

Ein Ohmscher Widerstand wird an einer Wechselspannungsquelle angeschlossen und die Strom-Spannungsverhältnisse berechnet (**Bild 12.7**).

Bei einem Widerstand sind Strom und Spannung in Phase.

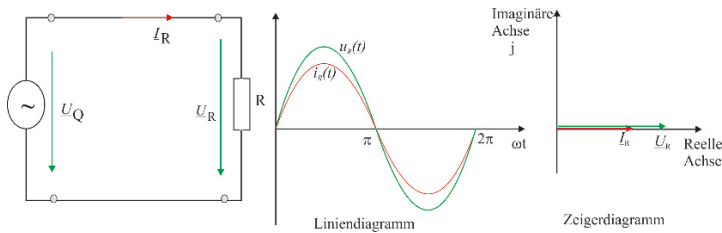


Bild 12.7: Wechselspannung und Wechselstrom am Ohmschen Widerstand

12.4.2 Wechselspannung und -strom an einer Induktivität

Eine Spule mit der Induktivität L wird an einer Wechselspannungsquelle angeschlossen und die Strom-Spannungsverhältnisse berechnet. Der Strom erzeugt in der Spule ein magnetisches Feld, das sich mit dem Strom ändert (**Bild 12.8**).

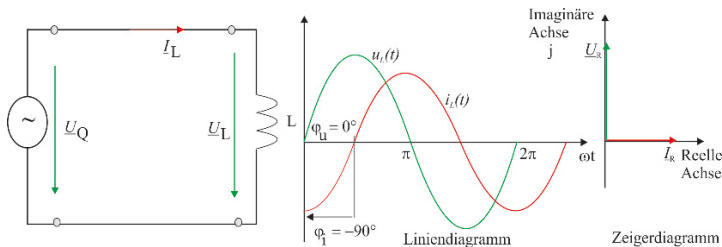


Bild 12.8: Wechselspannung und -strom an einer Induktivität

Eine Induktivität bewirkt eine Phasenverschiebung von 90° zwischen Spannung und Strom. Der Strom eilt der Spannung um 90° nach. Das Strommaximum folgt dem Spannungsmaximum 90° nach. Die Spannung eilt dem Strom um 90° voraus.

12.4.3 Wechselspannung und -strom am Kondensator

Ein Kondensator mit der Kapazität C wird an einer Wechselspannungsquelle angeschlossen und die Strom-Spannungsverhältnisse berechnet. Der Kondensator wird ständig aufgeladen und entladen, da die Spannung dauernd ihre Höhe und ihre Richtung ändert (**Bild 12.9**).

Ein Kondensator bewirkt eine Phasenverschiebung von 90° zwischen Spannung und Strom. Die Spannung eilt dem Strom um 90° nach. Das Spannungsmaximum folgt dem Strommaximum 90° nach. Der Strom eilt der Spannung um 90° voraus.

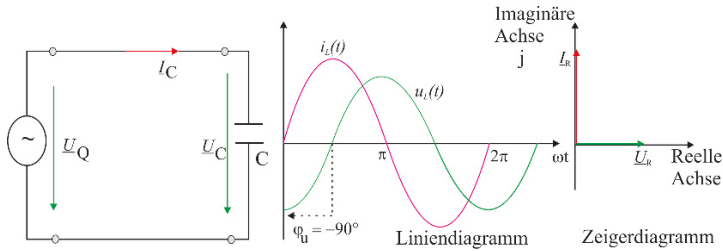


Bild 12.9: Wechselspannung und Wechselstrom am Kondensator

12.5 Berechnung von Sinusstromnetzwerken

Im Folgenden werden Sinusstromnetzwerke (Wechselstromnetzwerke) komplex berechnet. Die Kirchhoffschen Gesetze sind auch für diese Netze mit ihren komplexen Größen $\underline{U}$, $\underline{I}$, $\underline{Z}$ und $\underline{Y}$ gültig.

12.5.1 Reihenschaltung

Für die Reihenschaltung in Wechselstromnetzwerken ergeben sich weitgehend die gleichen Zusammenhänge wie bei der Reihenschaltung von Gleichstromnetzwerken.

RL-Reihenschaltung (Bild 12.10):

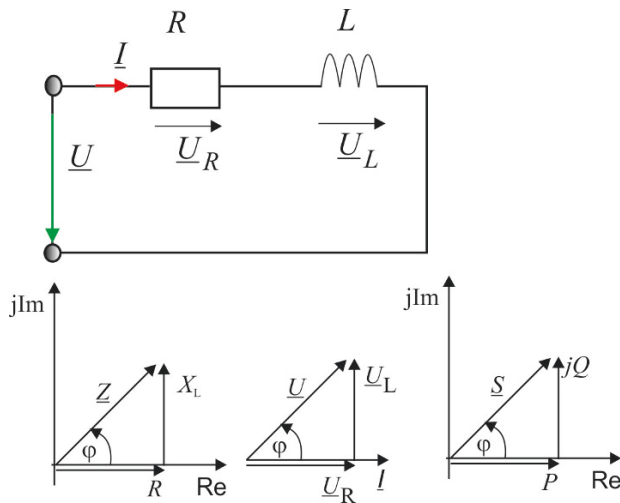


Bild 12.10: Darstellung der RL-Schaltung

Komplexer Widerstand:

$$\underline{Z} = R + jX = R + j\omega L = Z \cdot e^{j\varphi} \quad (12.23)$$

Scheinwiderstand:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (12.24)$$

Phasenwinkel:

$$\varphi = \arctan \frac{X}{R} \quad (12.25)$$

RC-Reihenschaltung (Bild 12.11):

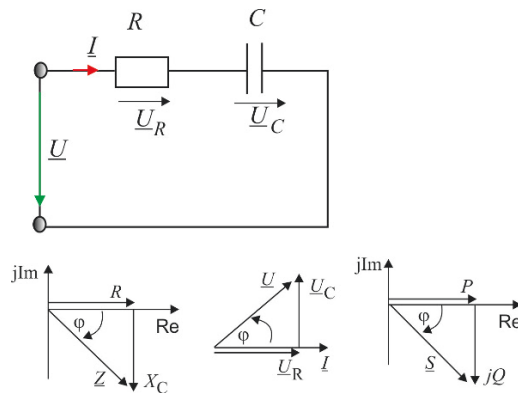


Bild 12.11: Darstellung der RC-Schaltung

Komplexer Widerstand:

$$\underline{Z} = R + jX = R + \frac{1}{j\omega C} \quad (12.26)$$

Scheinwiderstand:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (12.27)$$

Phasenwinkel:

$$\varphi = \arctan \frac{X_C}{R} \quad (12.28)$$

RLC-Reihenschaltung (Bild 12.12):

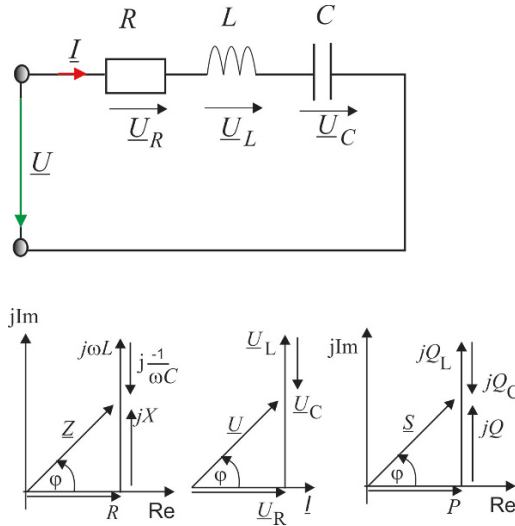


Bild 12.12: Darstellung der RLC-Schaltung

Komplexer Widerstand:

$$\underline{Z} = R + jX = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (12.29)$$

Scheinwiderstand:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (12.30)$$

Phasenwinkel:

$$\varphi = \arctan \frac{X}{R} = \sqrt{\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}} \quad (12.31)$$

12.5.2 Parallelschaltung

Für die Parallelschaltung in Wechselstromnetzwerken ergeben sich weitgehend die gleichen Zusammenhänge wie bei der Parallelschaltung von Gleichstromnetzwerken.

RL-Parallelschaltung (Bild 12.13):

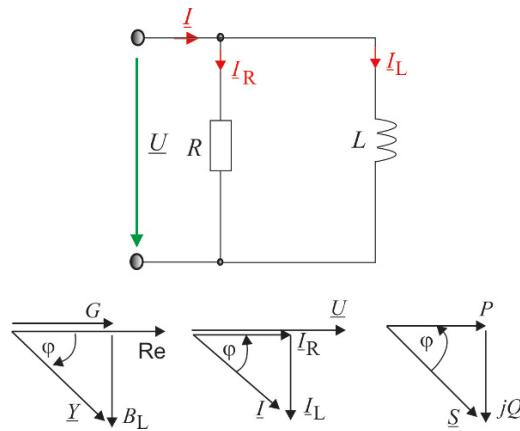


Bild 12.13: Darstellung der RL-Schaltung

Admittanz:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}$$

$$\underline{Y} = G + jB_L = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} \quad (12.32)$$

Der Betrag der Admittanz:

$$Y = \sqrt{G + B_L} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L}\right)^2} \quad (12.33)$$

Der Gesamtstrom:

$$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L = U \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L}\right)} \quad (12.34)$$

Scheinwiderstand:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L}\right)^2}} \quad (12.35)$$

Phasenwinkel:

$$\varphi = \arctan \frac{\frac{1}{\omega L}}{\frac{1}{R}} \quad (12.36)$$

RC-Parallelschaltung (Bild 12.14):

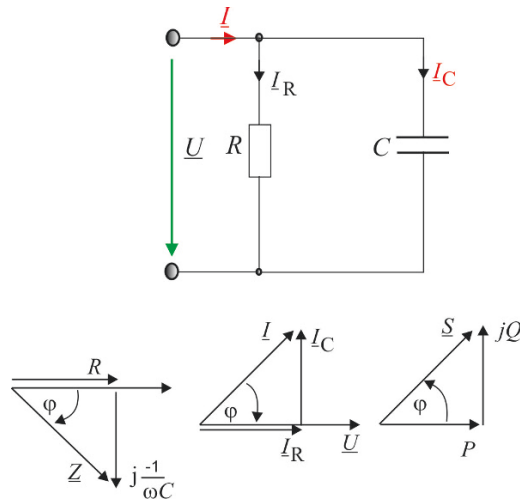


Bild 12.14: Darstellung der RC-Schaltung

Admittanz:

$$\underline{Y} = G + jB_C = \frac{1}{R} + j\omega C \quad (12.37)$$

Der Betrag der Admittanz:

$$Y = \sqrt{G^2 + B_C^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C)^2} \quad (12.38)$$

Der Gesamtstrom:

$$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_C = U \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + j\omega C} \quad (12.39)$$

Scheinwiderstand:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C)^2}} \quad (12.40)$$

Phasenwinkel:

$$\varphi = -\arctan \frac{R}{X_C} \quad (12.41)$$

RLC-Parallelschaltung (Bild 12.15):

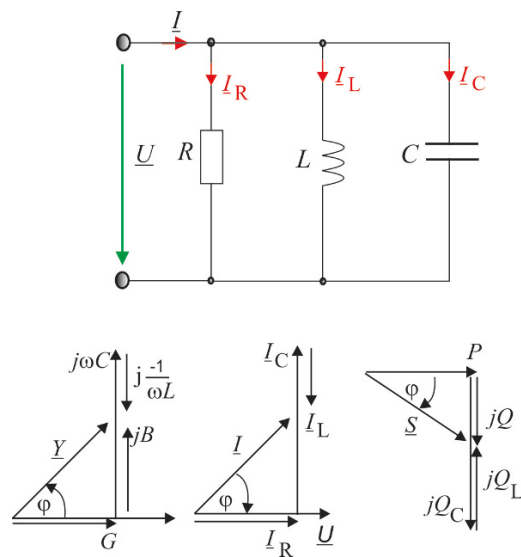


Bild 12.15: Darstellung der RLC-Schaltung

Admittanz:

$$\underline{Y} = G + jB_C - jB_L = G + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \quad (12.42)$$

Der Betrag der Admittanz:

$$Y = \sqrt{G + B_L - B_C} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2} \quad (12.43)$$

Der Gesamtstrom:

$$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_C + \underline{I}_L \quad (12.44)$$

$$I = \sqrt{(I_R)^2 + (I_C - I_L)^2} \quad (12.45)$$

12.6 Leistungen im Wechselstromkreis

Elektrische Maschinen und Geräte werden mit Wechselspannung und -strom angetrieben. Das bedeutet, dass die von ihnen abgegebene Leistung in Form von Wechselstromleistung zugeführt wird. Transformatoren, Elektromotoren und einige Beleuchtungsanlagen verfügen über Wicklungen, die neben ihrem induktiven Blindwiderstand X_L auf Grund der Widerstandseigenschaften des Wicklungsmaterials einen beachtlichen Wirkwiderstand R aufweisen, der nicht zu vernachlässigen ist.

Der Scheinwiderstand dieser Maschinen, Geräte und Anlagen führt zu Phasenverschiebungen zwischen Strom und Spannung, die nicht ohne nachteilige Folgen für das Elektroenergieversorgungssystem sind. Das ist der Grund dafür, warum wir uns nun mit der Spezifik der Wechselstromleistung befassen müssen.

Bei Wechselstrom schwingt die Leistung ebenso wie die Stromstärke und Spannung ständig zwischen einem Maximum und einem Minimum (**Bild 12.16**).

Sind Spannung und Strom zeitabhängige Wechselgrößen, dann ist auch die Leistung zeitabhängig.

Scheinleistung: Scheinleistung ist die geometrische Addition von Wirk- und Blindleistung und eine Bemessungsgröße für die Betriebsmittel.

Für Stern- und Dreieckschaltungen gilt (gleicher Phasenwinkel in jedem Strang):

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* \Rightarrow U = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (12.46)$$

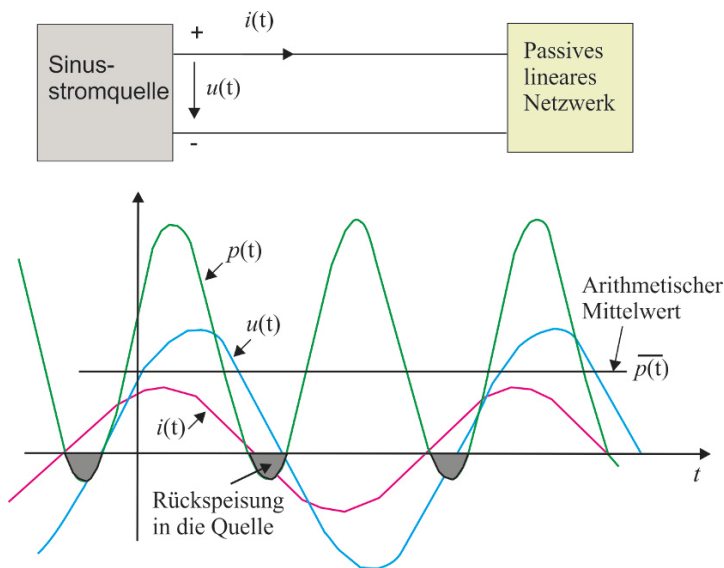


Bild 12.16: Leistungen im Drehstromsystem

$$S_{\text{Gesamt}} = 3 \cdot S_{\text{Str}} \quad (12.47)$$

Wirkleistung: Die Wirkleistung ist der Anteil der Scheinleistung, der beim Verbraucher Arbeit verrichtet und dabei letztendlich in Wärme übergeht.

$$P_{\text{Str}} = U_{\text{Str}} \cdot I_{\text{Str}} \cdot \cos \varphi_{\text{Str}} \quad (12.48)$$

Blindleistung: Die Blindleistung pendelt zwischen dem Erzeuger und Verbraucher, belastet das Netz, beeinträchtigt die effektive Übertragung der Wirkleistung verursacht Verluste.

Um das zu verhindern, gibt es technische Maßnahmen. Die Blindleistung schwingt mit der doppelten Frequenz 2ω um die Nulllinie. Ihre Ursache ist die zwischen aktivem (Erzeuger) und passivem (Verbraucher) Zweipol hin und her pendelnde Energie.

Zwischenzeitlich wird diese Energie im elektrischen Feld (Kondensator) bzw. magnetischen Feld (Induktivität) des Verbraucherzweipols gespeichert. Durch Blindleistung wird im zeitlichen Mittel im Verbraucher keine Energie (z.B. in Wärme) irreversibel umgesetzt.

Die Energiependelung zwischen Erzeuger und Verbraucher belastet jedoch die Kabel und Leitungen und führt zu thermischen Belastungen (Verlustleistungen).

Man versucht daher in technischen Anlagen, wo durch den Einsatz von Kapazitäten und Induktivitäten Blindleistungen entstehen, diese durch geeignete Schaltungen zu kompensieren.

Die Blindleistung Q wird in der Einheit Var angegeben. Zur Berechnung der Blindleistung führt man die Begriffe Blindspannung und Blindstrom ein. Es sind die Komponenten der Spannungs- und Stromzeiger, die parallel zur imaginären Achse in der komplexen Ebene des Zeigerdiagramms liegen.

$$Q_{Str} = U_{Str} \cdot I_{Str} \cdot \sin\varphi_{Str} \quad (12.49)$$

12.6.1 Blindstromkompensation

Bei der Zusammenschaltung beliebiger Bauelemente (Widerstände, Spulen, Kapazität) (**Bild 12.17**) im Wechselstromkreis ergibt sich eine resultierende Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, die dazu führt, dass sich neben einer Wirkleistung auch eine Blindleistung ergibt.

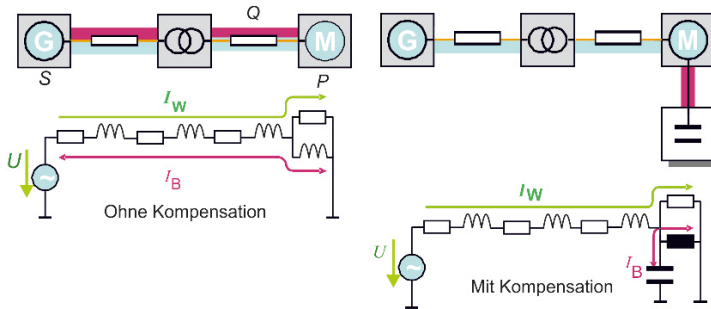


Bild 12.17: Kompensation im Drehstromsystem

$$Q_C = P \cdot \tan\varphi \quad (12.50)$$

Die Größe der notwendigen Kondansatorkapazität beträgt für Wechselstrom

$$C = \frac{Q_C}{\omega \cdot U^2} \quad (12.51)$$

und für Drehstrom

$$C = \frac{Q_C}{3 \cdot \omega \cdot U^2} \quad (12.52)$$

12.6.2 Leistungsfaktor

Die Wirkleistung errechnet sich aus der Summe der Einzelwirkleistungen der Stränge. Da die Summe der Phasenverschiebungen zwischen den Strängen den Wert Null ergibt, ist die Summenleistung stets konstant.

Leistungsfaktor: Um einen Wechselstromverbraucher hinsichtlich seiner Wirkleistungsaufnahme zu kennzeichnen, verwendet man den Leistungsfaktor. Bei rein sinusförmigen Spannungen und Strömen 50Hz ist der Leistungsfaktor gleich dem Verschiebungsfaktor.

Verschiebungsfaktor: Diese Größe wird als Leistungsfaktor bezeichnet und ist eine wichtige Größe für die Qualitätsbewertung von Motoren und elektrischen Antrieben.

Praktische Beispiele:

Jeder Motor kann intern aus einem Widerstand und einer Spule zusammengesetzt betrachtet werden. Daher hat jeder Motor neben der aufgenommenen Wirkleistung auch Blindleistung, die sich zur gesamten aus dem Netz gezogenen Scheinleistung addieren. Insbesondere bei großen Verbrauchern können die induktiven Blindanteile einen hohen Wert erreichen. Aus diesem Grund werden bei Abnehmern mit großen Motoren zusätzlich Blindstromzähler vorgesehen oder der Abnehmer installiert eine entsprechende Blindstromkompensationsanlage.

Spannungsfall und Leistungsverlust auf Zuleitungen: Wie bereits bei dem Gleichstromkreis besprochen, fällt an einem elektrischen Leiter, der z.B. als Zuleitung für einen Motor dient, eine Spannung und damit eine Leistung über diesem Leiter ab. Bei Einsatz von Wechselströmen muss in diesem Fall der Leistungsfaktor zusätzlich berücksichtigt werden.

Auslegung von Zuleitungen: Der Leistungsfaktor hat bei Anlegung einer bestimmten Netzspannung einen unmittelbaren Einfluss auf den Strom, den ein Motor im Betrieb aufnimmt. Dies muss bei der Auslegung von Zuleitungen (Leitungsquerschnitt) berücksichtigt werden. Somit ergibt sich zusammenfassend (**Bild 12.18**).

Wirkleistung in W:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (12.53)$$

Scheinleistung in VA:

$$S = U \cdot I \quad (12.54)$$

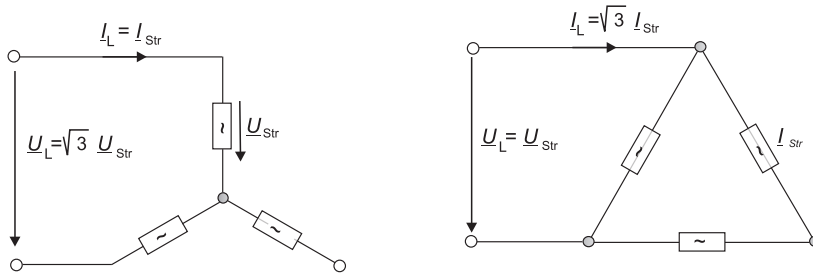


Bild 12.18: Leistungen im Drehstromsystem

Blindleistung in var:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi \quad (12.55)$$

Leistungsfaktor:

$$\lambda = \frac{P}{S} \leq 1 \quad (12.56)$$

Bei 50 Hz gilt $\lambda = \cos\varphi$.

12.6.3 Beispiel: Leistungen

Bei einem 4-kW-Wechselstrom-Verbraucher an $U = 230 \text{ V}$ beträgt der Leistungsfaktor $\cos\varphi = 0,8$. Der Leistungsfaktor soll auf $\cos\varphi = 0,95$ verbessert werden. Berechnen Sie die Kondensatorkapazität und den Phasenverschiebungswinkel. Wie groß sind Schein-, Wirk- und Blindleistung des Verbrauchers?

Vor der Kompensation:

$$S_1 = \frac{P}{\cos\varphi_1} = \frac{4 \text{ kW}}{0,8} = 5 \text{ kVA}$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin\varphi_1 = 5 \text{ kVA} \cdot 0,6 = 3 \text{ kvar}$$

Nach der Kompensation:

$$S_2 = \frac{P}{\cos\varphi_2} = \frac{4 \text{ kW}}{0,95} = 4,2105 \text{ kVA}$$

$$Q_2 = S_2 \cdot \sin\varphi_2 = 4,2105 \text{ kVA} \cdot 0,337 = 1,418 \text{ kvar}$$

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = 3 \text{ kvar} - 2,5263 \text{ kvar} = 0,4737 \text{ kvar}$$

$$C = \frac{Q_C}{\omega \cdot U^2} = \frac{0,4737 \text{ kVAa}}{\omega \cdot (230 \text{ V})^2} = 28,5 \text{ nF}$$



13 Drehstromtechnik

In diesem Kapitel werden folgende Themen behandelt [3], [5], [7], [8]:

1. die Schaltungen von Drehstromsystemen,
2. die Schaltungen von Quellen und Verbrauchern,
3. die symmetrischen und unsymmetrischen Schaltungen und
4. der Verkettungsfaktor.

Elektrische Energie wird in Kraftwerken durch Energieumwandlung aus mechanischer Energie (Turbinenrotor) bzw. Wärmeenergie (Dampferzeuger) und chemischer Energie (Verbrennung) gewonnen und über längere Strecken übertragen, verteilt und in andere Energieformen umgeformt. Die Übertragung und Verteilung erfolgt mit dem symmetrischen Dreiphasensystem. Es wird auch als Drehstromsystem bezeichnet. Zu seiner Erzeugung ist eine Anordnung mit drei um 120° räumlich versetzten Spulen erforderlich. Man bezeichnet die Spulen auch als Stränge. In ihnen werden drei gleich große Wechselspannungen induziert, die um jeweils $360^\circ/3 = 120^\circ$ gegeneinander phasenverschoben sind. Es wird zwischen drei- und einphasigen Verbrauchern unterschieden. Drehstromverbraucher bestehen aus drei einzelnen Widerständen oder Spulen (Verbrauchern), die man auch als Stränge bezeichnet. Sie sind in der Regel als Stern- oder in Dreieckschaltung geschaltet.

13.1 Arten der Drehstromsysteme, Bezeichnungen

Die Sternschaltung (Y) ist gekennzeichnet durch den Sternpunktknoten, an dem sowohl alle Spulenabgänge wie auch der Neutralleiter miteinander verbunden sind. Bei der Dreieckschaltung wird jeweils ein Spulenausgang an den Anfang der benachbarten Spule angeschlossen. Diese Anschlussknoten werden dann wiederum an die drei Außenleiter L1, L2 und L3 geführt. Unter der Strangspannung versteht man die messbare Spannung zwischen zwei Punkten eines Stranges. Die

Strangspannung beträgt ca. 230V. Die einzelnen Strangspannungen werden durch die Strangbezeichnung und dessen Index bezeichnet z.B. für V-Strangspannung.

Unter der verketteten Spannung (auch Außenleiterspannung) versteht man die messbare Spannung zwischen zwei Strängen. Zur Übertragung der Wechselspannungen und -ströme vom Generator zum Verbraucher können die stromführenden Leiter der Wicklungsstränge unterschiedlich zusammengeschaltet werden (**Bilder 13.1 bis 13.8**).

Bei großen Leistungen ist es vorteilhaft, die elektrische Energie nicht in Form einer einfachen Wechselspannung bereitzustellen und mit einer Doppelleitung zu übertragen, sondern mehrphasige Spannungs- und Stromsysteme zu erzeugen und mit einer Mehrfachleitung zu übertragen. Von besonderer technischer Bedeutung ist das symmetrische Dreiphasen- oder Drehstromsystem.

13.2 Schaltungen der Drehstromsysteme

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Schaltungsarten für Quelle und Verbraucher beschrieben. Dreiphasenwechselströme bestehen aus drei Wechselspannungsquellen, die jeweils um 120° phasenverschoben sind. Mit drei Spannungsquellen benötigt man sechs Leitungen. In der Energietechnik werden aber nur drei oder vier Leitungen gebraucht. Dazu gibt es zwei Schaltungsvarianten für die Quellen und die Verbraucher. **Bild 13.1** zeigt eine Übersicht eines Dreiphasensystems mit dem Sternpunktleiter. Die drei Wechselspannungen und die Zeigerdiagramme von Spannungen sind in **Bild 13.2 und 13.3** dargestellt.

Zuerst werden die Schaltungsvarianten für die Quellen und die Verbraucher gezeigt (**Bilder 13.4 bis 13.7**).

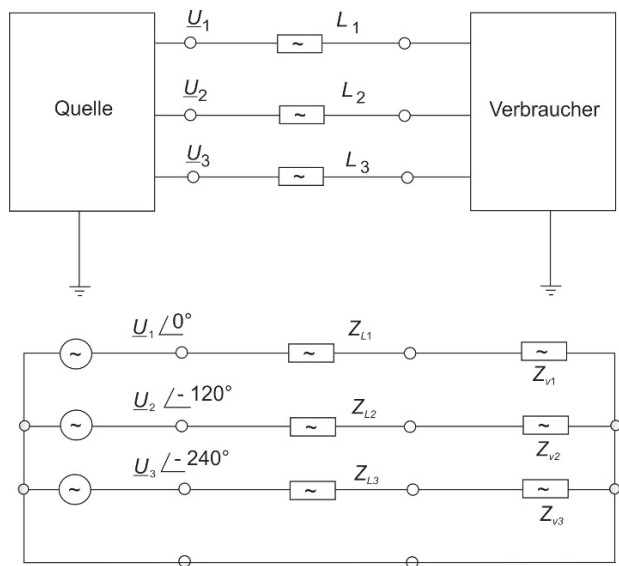


Bild 13.1: Übersicht eines Dreiphasensystems

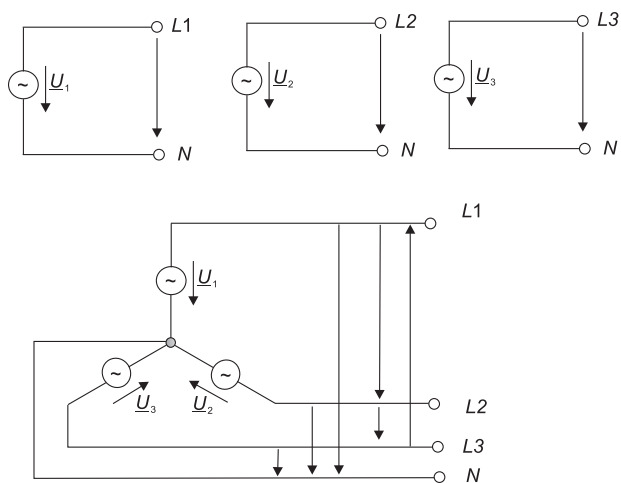


Bild 13.2: Strangspannungen der Sternschaltung

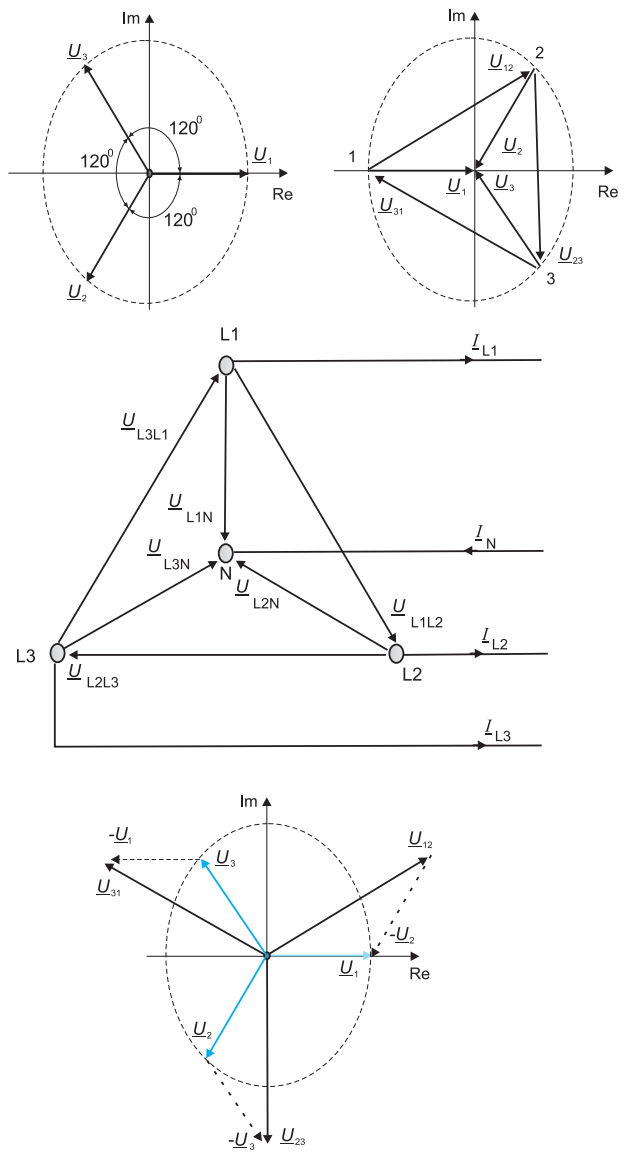


Bild 13.3: Zeigerdiagramme von Spannungen

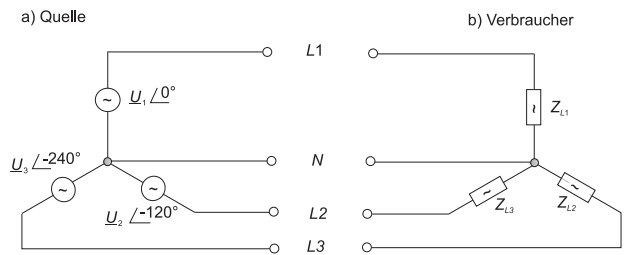


Bild 13.4: Quelle und Verbraucher als Sternschaltung geschaltet

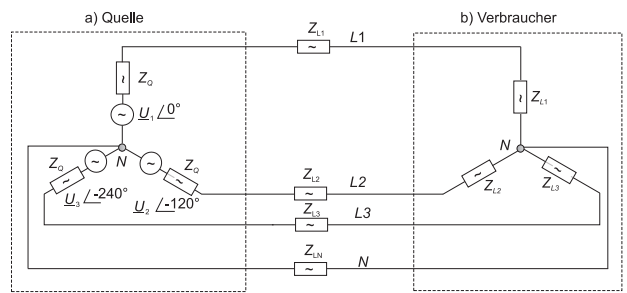


Bild 13.5: Quelle und Verbraucher als Sternschaltung geschaltet

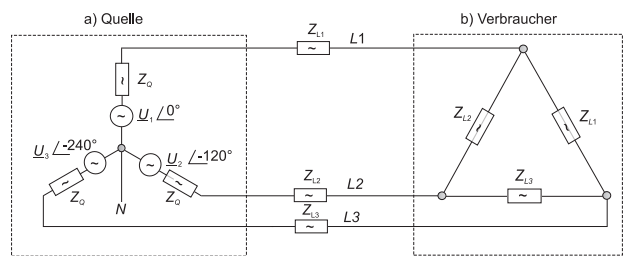


Bild 13.6: Quelle als Sternschaltung und Verbraucher als Dreieckschaltung geschaltet

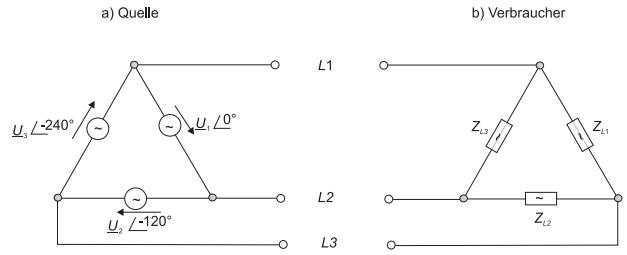


Bild 13.7: Quelle und Verbraucher als Dreieckschaltung geschaltet

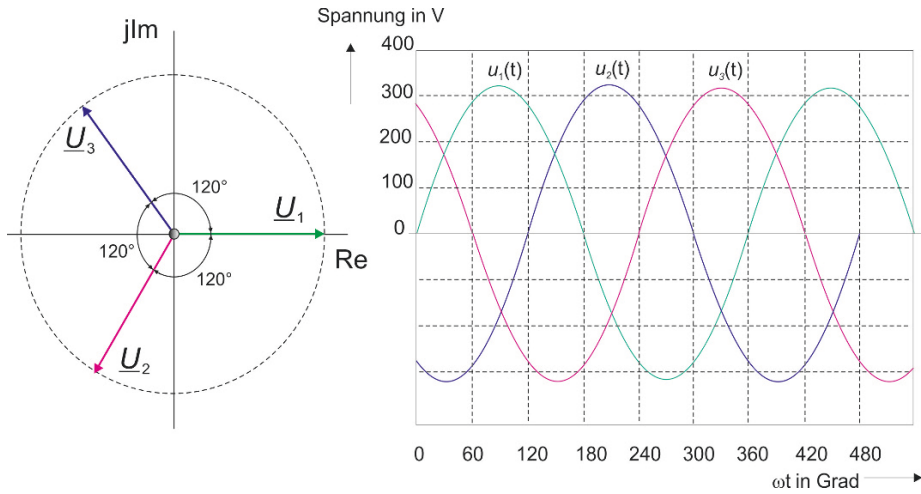


Bild 13.8: Zeiger- und Liniendiagramme von Spannungen

Die einzelnen Strangspannungen kann man wie folgt beschreiben:
(Bild 13.8).

$$u_1(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t) \quad (13.1)$$

$$u_2(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (13.2)$$

$$u_3(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (13.3)$$

Eine andere Möglichkeit, die Leiterspannungen zu beschreiben, ist:

$$\underline{U}_1 = U_1 \cdot e^{j^\circ} \quad (13.4)$$

$$\underline{U}_2 = U_1 \cdot e^{-j120^\circ} \quad (13.5)$$

$$\underline{U}_3 = U_1 \cdot e^{-j240^\circ} \quad (13.6)$$

Bei der Sternschaltung werden die Spannungen unterteilt in:

a) Sternpunktspannungen: $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3$. Diese Spannungen sind um 120° phasenverschoben.

b) Leiter-Leiter-Spannungen (Leiterspannungen) oder verkettete Spannungen: $\underline{U}_{12}, \underline{U}_{23}, \underline{U}_{31}$

$$\underline{U}_1 = U_{Str} \cdot e^{j^\circ} = U_{Str} \quad (13.7)$$

$$\underline{U}_2 = U_{Str} \angle -120^\circ = U_{Str} \cdot (-0,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2}) \quad (13.8)$$

$$\underline{U}_3 = U_{Str} \angle -240^\circ = U_{Str} \cdot (-0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}) \quad (13.9)$$

Die Summe der drei symmetrischen Spannungen (Größen) ist immer null.

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3 = 0 \quad (13.10)$$

Die Außenleiterspannungen sind:

$$\underline{U}_{12} + \underline{U}_{23} + \underline{U}_{31} = 0 \quad (13.11)$$

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2 = U_{Str} [e^{j0^\circ} - e^{j120^\circ}] = \sqrt{3} \cdot U_{Str} \angle -30^\circ \quad (13.12)$$

$$\underline{U}_{23} = \underline{U}_2 - \underline{U}_3 = U_{Str} [e^{j120^\circ} - e^{j240^\circ}] = \sqrt{3} \cdot U_{Str} \angle -90^\circ \quad (13.13)$$

$$\underline{U}_{31} = \underline{U}_3 - \underline{U}_1 = U_{Str} [e^{j240^\circ} - e^{j0^\circ}] = \sqrt{3} \cdot U_{Str} \angle -210^\circ \quad (13.14)$$

Die Beziehung zwischen Strang- und Leiterspannungen ist:

$$U_L = U_{Str} \cdot \sqrt{3} \quad (13.15)$$

Die Leiterspannungen sind das $\sqrt{3}$ -fache der Strangspannungen.

13.3 Schaltungen des Verbrauchers

Symmetrische Sternschaltungen mit Neutralleiter (Bild 13.9):

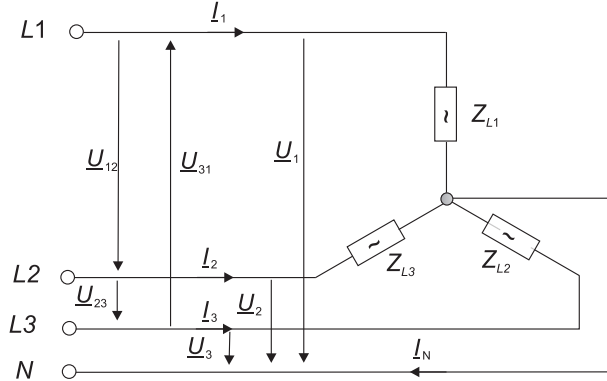


Bild 13.9: Sternschaltung mit Neutralleiter

Die Außenleiter und der Sternpunkt der Quelle und des Verbrauchers werden zusammengeschaltet.

Es gilt:

$$\underline{U}_1 = U_{Str} \cdot e^{j^\circ} \quad (13.16)$$

$$\underline{U}_2 = U_{Str} \cdot e^{-j120^\circ} \quad (13.17)$$

$$\underline{U}_3 = U_{Str} \cdot e^{-j240^\circ} \quad (13.18)$$

Für die Außenleiterströme erhält man:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}} \quad (13.19)$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}} = \underline{I}_1 \cdot e^{-j120^\circ} \quad (13.20)$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_3}{\underline{Z}} = \underline{I}_1 \cdot e^{-j240^\circ} \quad (13.21)$$

Der Strom im Neutralleiter bei einem symmetrischen System ist:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{I}_1 \cdot [1 + e^{-j120^\circ} + e^{-j240^\circ}] = 0 \quad (13.22)$$

Mit

$$I_L = I_{Str}$$

Symmetrische Dreieckschaltungen (Bild 13.10):

Die Außenleiter der Quelle und des Verbrauchers werden zusammengeschaltet. Für die Ströme im Dreieck kann man schreiben: Bei einer symmetrischen Schaltung sind ($\underline{Z} = \underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{31}$) die Strangströme dem Betrage nach gleich groß und um 120° gegeneinander phasenverschoben.

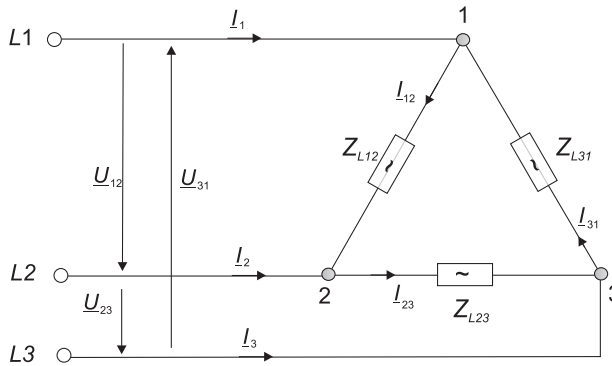


Bild 13.10: Dreieckschaltung

Die Außenleiterspannungen ergeben sich zu:

$$\underline{U}_{12} = U_1 \angle 0^\circ \quad (13.23)$$

$$\underline{U}_{23} = U_1 \cdot e^{-j120^\circ} \quad (13.24)$$

$$\underline{U}_{31} = U_1 \cdot e^{-j240^\circ} \quad (13.25)$$

Die Strangströme ergeben sich zu:

$$\underline{I}_{12} = \frac{\underline{U}_{12}}{\underline{Z}} \quad (13.26)$$

$$\underline{I}_{23} = \frac{\underline{U}_{23}}{\underline{Z}} = \underline{I}_{12} \cdot e^{-j120^\circ} \quad (13.27)$$

$$\underline{I}_{31} = \frac{\underline{U}_{31}}{\underline{Z}} = \underline{I}_{12} \cdot e^{-j240^\circ} \quad (13.28)$$

Die Außenleiterströme lassen sich durch Anwendung der Knotenregel angeben:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31} = \underline{I}_{12} \cdot \sqrt{3} \angle -30^\circ \quad (13.29)$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12} = \underline{I}_{12} \cdot \sqrt{3} \angle -150^\circ \quad (13.30)$$

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{23} = \underline{I}_{12} \cdot \sqrt{3} \angle -270^\circ \quad (13.31)$$

Die Außenleiterströme sind das $\sqrt{3}$ -fache der Strangströme.

$$\underline{I} = \sqrt{3} \cdot I_{Str} \quad (13.32)$$

13.4 Unsymmetrische Drehstromsysteme

Es gibt zwei Möglichkeiten um unsymmetrische Drehstromsysteme zu beschreiben:

1. die Erzeugerspannungen sind in Magnitude und Winkel verschieden.
2. die Lastimpedanzen sind nicht gleich.

Wir werden die Lastimpedanzen betrachten.

Unsymmetrische Sternschaltung (Bild 13.11):

Die Außenleiterströme:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{L1}} \quad (13.33)$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{L2}} \quad (13.34)$$

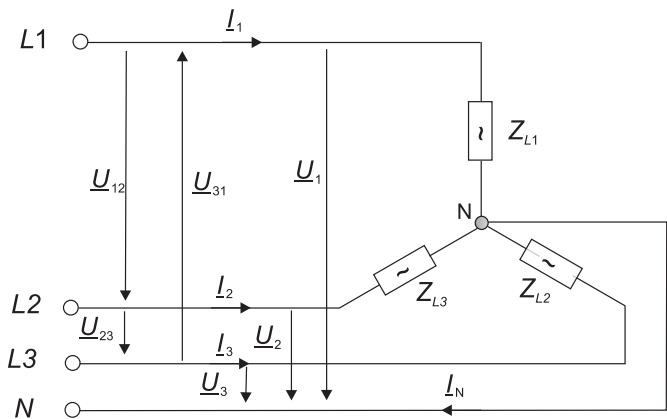


Bild 13.11: Unsymmetrische Sternschaltung mit Neutraleiter

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_3}{\underline{Z}_{L3}} \quad (13.35)$$

$$\underline{I}_N = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 \quad (13.36)$$

Unsymmetrische Dreieckschaltung (Bild 13.12):

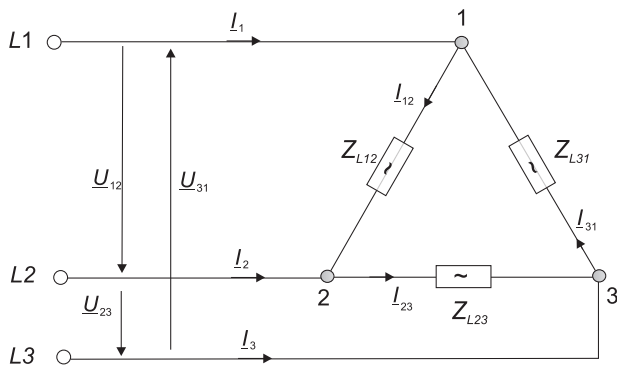


Bild 13.12: Unsymmetrische Dreieckschaltung

13.5 Verkettungsfaktor

Der Zusammenhang zwischen Dreieckschaltung und Sternschaltung wird in **Bild 13.13** gezeigt.

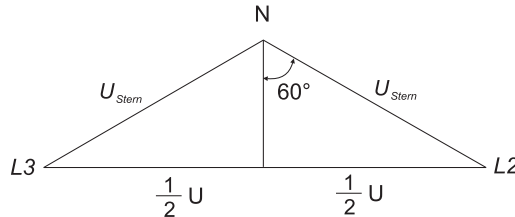


Bild 13.13: Zusammenhang zwischen Dreieckschaltung und Sternschaltung

$$U_{23} = U = U_{Dreieck} \quad (13.37)$$

$$\frac{\frac{1}{2} \cdot U_{Dreieck}}{U_{Stern}} = \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{U_{Dreieck}}{U_{Stern}} = \sqrt{3} \quad (13.38)$$

13.6 Leistungen in der Drehstromtechnik

In der Elektrotechnik werden drei Leistungsarten unterschieden:

Scheinleistung in VA (Volt Ampère):

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (13.39)$$

Wirkleistung in W (Watt):

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (13.40)$$

Blindleistung in var (volt ampère reaktiv):

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (13.41)$$

Die Spannungen und Ströme sind Effektivwerte.

13.7 Beispiel: Verbraucherströme

Drei 1-phasige Verbraucher sind an ein Drehstromnetz 400 V/230 V, 50 Hz angeschlossen (**Bild 13.14**). Berechnen Sie bei der Schaltung die Betriebsströme der Verbraucher.

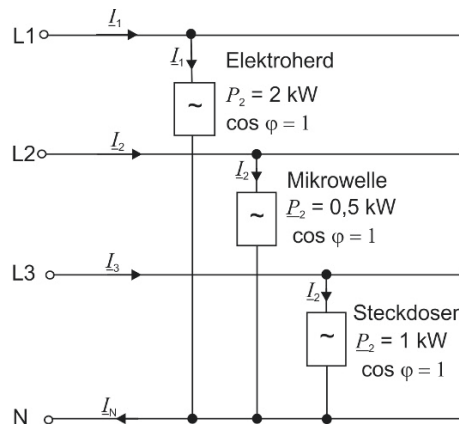


Bild 13.14: Berechnung der Ströme

Betriebsstrom des Elektroherdes:

$$I_b = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi} = \frac{2000 \text{ W}}{230 \text{ V} \cdot 1} = 8,7 \text{ A}$$

Betriebsstrom der Mikrowelle:

$$I_b = \frac{P}{U_0 \cdot \cos \varphi} = \frac{500 \text{ W}}{230 \text{ V} \cdot 1} = 2,17 \text{ A}$$

Betriebsstrom der Steckdosen:

$$I_b = \frac{P}{U_0 \cdot \cos \varphi} = \frac{1000 \text{ W}}{230 \text{ V} \cdot 1} = 4,34 \text{ A}$$

Bis hierher wurden die Grundlagen der Elektrotechnik beschrieben und die wichtigsten Gesetze und Regeln aufgezeigt. Wie die Elektrotechnik in der Praxis umgesetzt wird, werden wir in den folgenden Kapiteln kennenlernen.

14 Normen und Vorschriften

14.1 Begriffe, Definitionen und Normen

In diesem Kapitel werden

1. die Wichtigkeit der Begriffe, Definitionen und Normen und
2. die Normungsarbeit der DKE (DIN VDE)

erklärt [10, 11].

Bei der Planung und Projektierung von Elektroanlagen sind Rechtsvorschriften und die Allgemein anerkannten Regeln der Technik zu beachten. Dabei sind die technischen Regeln des Verbandes der Elektrotechnik Elektronik Informations-technik e.V. (VDE) einzuhalten. Das VDE-Vorschriftenwerk ist nach VDE 0022 in **Bild 14.1** gezeigt.

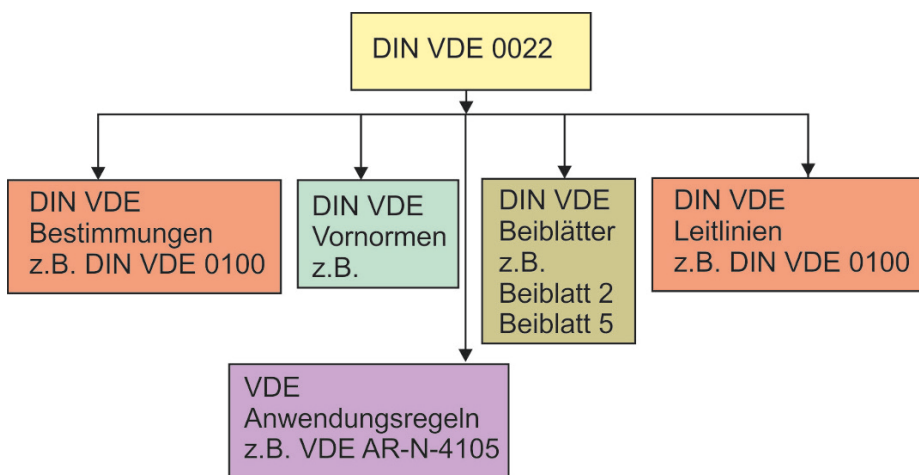


Bild 14.1: VDE-Vorschriftenwerk

DIN, DIN VDE, EN und IEC Normen enthalten die Regeln für die Planung und Errichtung elektrischer Anlagen, um die Sicherheit und richtige Funktion zu erreichen. Die erste Sicherheitsvorschriften für elektrische Starkstromanlagen wurde 1896 beim VDE in Berlin veröffentlicht (**Bild 14.2**).



Bild 14.2: VDE Bestimmungen

Zur Beschreibung bestimmter Tätigkeiten, Betriebsmittel und Anlagen sind die allgemein gültigen Begriffe in den DIN- und DIN VDE-Normen umfassend erklärt (**Bild 14.3**).

Die nachfolgenden Begriffe sind für die Planung und Projektierung von elektrischen Anlagen sehr wichtig. Die Definitionen weiterer Begriffe finden sich in der jeweiligen Norm.

- Elektrische Anlage:
Zusammenschluss von elektrischen Betriebsmitteln zum Erzeugen, Fortleiten, Umwandeln, Verteilen und Verbrauchen elektrischer Energie mit dem Zweck des Verrichtens von Arbeit in Form von mechanischer Arbeit, zur Wärme- und Lichterzeugung oder für elektrochemische Prozesse.
- Elektrische Betriebsmittel:
Gegenstände, die in elektrischen Anlagen benutzt werden und dem Anwenden elektrischer Energie dienen. Man kann sie einteilen in ortsfeste, festangebrachte und ortsveränderliche Geräte sowie Handgeräte.
- Elektrische Betriebsräume:
Abgegrenzte Räume, Bereiche und Schränke für elektrische Anlagen, die der Unterbringung von Betriebsmitteln dienen.
- Instandhaltung:
Oberbegriff für Inspektion, Wartung, Instandsetzung, Erneuerung und Überwachung elektrischer Anlagen.

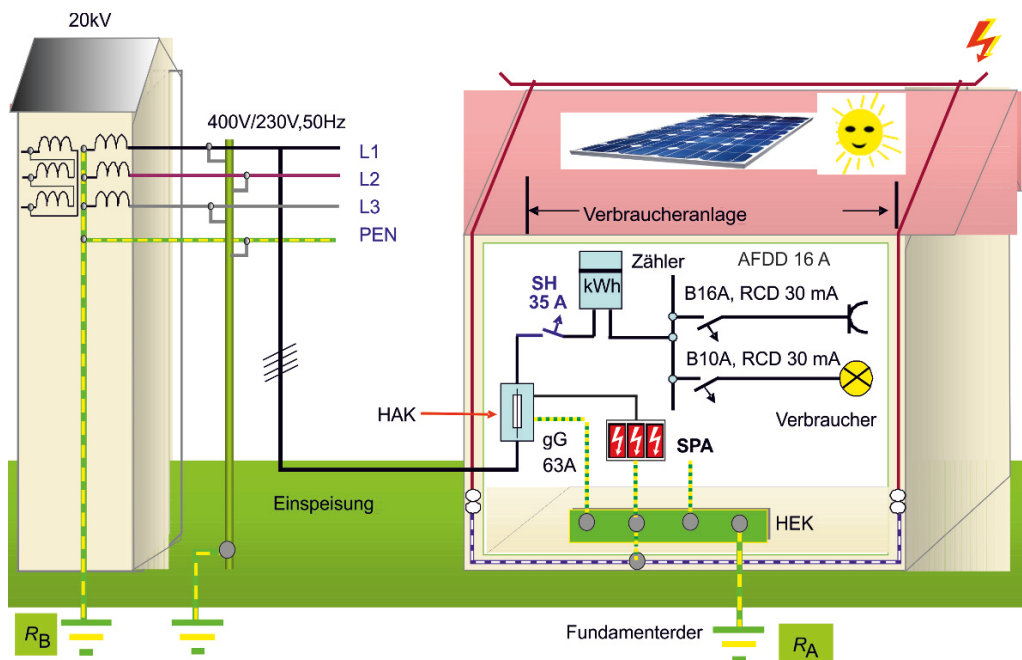


Bild 14.3: Aufbau einer NS-Verteilungsanlage

- **Elektrofachkraft:**
Nach DIN VDE 0100 Teil 10 und DIN VDE 0105 eine Person, die die fachliche Qualifikation (z.B. fachliche Ausbildung, mehrjährige Mithilfe bei Elektrofachkräften, Kenntnisse und Erfahrungen, Kenntnisse der einschlägigen Normen, Fähigkeit zum Erkennen von Gefahren und Beurteilung der übertragenen Arbeiten) für das Errichten und den Betrieb elektrischer Anlagen und Betriebsmittel besitzt.
- **Elektrotechnisch unterwiesene Person:**
Person, die weniger qualifiziert ist als eine Elektrofachkraft. Von ihr werden Kenntnisse, fachgerechtes Verhalten und das fachgerechte Ausführen von Aufgaben verlangt.
- **Elektrotechnischer Laie:**
Weder eine Elektrofachkraft noch eine unterwiesene Person. Er ist nicht zuständig für das Errichten, Ändern und Betreiben elektrischer Anlagen. Er darf nur unter ständiger Aufsicht und Leitung einer Elektrofachkraft arbeiten.
- **Elektrotechnische Regeln:**
'Allgemein anerkannte Regeln der Technik', die in den DIN-VDE-Normen enthalten sind und auf die die Berufsgenossenschaft verweist. Solche Normen sind Bestandteile der Unfallverhütungsvorschriften (UVV) und damit rechtsverbindliche elektrotechnische Regeln, die zwingend eingehalten werden müssen.

- Energiewirtschaftsgesetz: (2. DVO) § 1 Abs. 1:
Bei der Errichtung und Unterhaltung von Anlagen zur Erzeugung, Fortleitung und Abgabe von Elektrizität sind die allgemein anerkannten Regeln der Technik zu beachten.
- Unfallverhütungsvorschrift der Berufsgenossenschaften BGV A2
Abs. 3:
Der Unternehmer hat dafür zu sorgen, dass elektrische Anlagen und Betriebsmittel nur von oder unter Leitung und Aufsicht einer Elektrofachkraft errichtet, geändert und instandgehalten werden.
Abs. 5: Der Unternehmer hat dafür zu sorgen, dass die elektrischen Anlagen und Betriebsmittel auf ihren ordnungsmäßigen Zustand geprüft werden.
- Bürgerliches Gesetzbuch (BGB):
Das BGB stellt die Frage nach der Schuld in den Vordergrund:
§ 276:
Fahrlässig handelt, wer die im Verkehr erforderliche Sorgfalt außer Acht lässt. Der Planer oder Errichter kann diese Sorgfalt nur nachweisen, wenn er die Allgemein anerkannten Regeln der Technik berücksichtigt.
- Strafgesetzbuch (StGB):
Das StGB wird als Verstoß gegen die Interessen der Allgemeinheit verstanden.
§ 323:
(1) Wer bei der Planung, Leitung und Ausführung eines Baues oder Abbruchs gegen die allgemein anerkannten Regeln der Technik verstößt und dadurch Leib oder Leben eines anderen gefährdet, wird mit Freiheitsstrafe bis zu 5 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

14.2 Übersicht und Bedeutung über die Normen und Vorschriften

14.2.1 DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (VDE-DKE) ist ein technisch-wissenschaftlicher Verein mit Sitz in Berlin. Die vom VDE getragene DKE (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE) erarbeitet Normen und Sicherheitsbestimmungen für die Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik. Sie vertritt die deutschen Interessen im Europäischen Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) und in der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC). Rund 3.500 Experten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung erarbeiten das VDE-Vorschriftenwerk in der DKE. Die VDE-

Bestimmungen basieren heute größtenteils auf Europäischen Normen, die zu etwa 80 Prozent das Ergebnis der internationalen Normungsarbeit der IEC sind. Am 5. Juni 1975 hat die Bundesregierung mit dem DIN den sogenannten „Normenvertrag“, und am 4. Juli 1990 die ehemalige Deutsche Demokratische Republik mit dem DIN die Vereinbarung über die Schaffung einer Normenunion geschlossen. Dadurch wurde das DIN nach Maßgabe der Grundsätze der Normungsarbeit (DIN 820-1) als die zuständige Normungsorganisation für die Bundesrepublik Deutschland einschließlich der neuen Bundesländer anerkannt. Als die nationale Normenorganisation vertritt das DIN die deutschen Interessen in nichtstaatlichen internationalen Normenorganisationen. Das DIN verfolgt ausschließlich und unmittelbar gemeinnützige Zwecke, indem es durch Gemeinschaftsarbeit der interessierten Kreise zum Nutzen der Allgemeinheit Deutsche Normen oder andere Arbeitsergebnisse aufstellt, die der Rationalisierung, der Qualitätssicherung, der Sicherheit, dem Umweltschutz und der Verständigung in Wirtschaft, Technik, Wissenschaft, Verwaltung und der Öffentlichkeit dienen. Das DIN veröffentlicht und fördert die Anwendung der Normen. Normung wird als eine Aufgabe der Selbstverwaltung der an ihr interessierten Kreise unter Einschluss des Staates verstanden.

14.2.2 DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik im DIN und VDE

Die DKE (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE) nimmt die Normungs- und Vorschriftenarbeit wahr, die als elektrotechnische Normungsarbeit bis zur Gründung der Kommission im Jahr 1970 im Fachnormenausschuss Elektrotechnik (FNE) im Deutschen Normenausschuss (jetzt: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.) einerseits und als elektrotechnische Vorschriftenarbeit sowie im Technischen Ausschuss und in der Vorschriftenstelle des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE) (jetzt: Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.) andererseits durchgeführt wurde sowie Normungsarbeit in dem Bereich der Elektronik und Informationstechnik, sowie letztere nicht bereits im Jahr 2000 im Tätigkeitsbereich anderer Normenausschüsse des DIN lagen. Die DKE nimmt dabei die Interessen der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik auf dem Gebiet der internationalen und regionalen elektrotechnischen Normungsarbeit wahr. Sie ist infolgedessen zuständig für die Normungsarbeiten, die in den entsprechenden internationalen und regionalen Organisationen (vor allem IEC, CENELEC und ETSI) behandelt werden.

Die Ergebnisse der elektrotechnischen Normungsarbeit der DKE werden in DIN-Normen niedergelegt, die als Deutsche Normen in das Deutsche Normenwerk des

DIN und, wenn sie sicherheitstechnische Festlegungen enthalten, gleichzeitig als VDE-Bestimmungen in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen werden.

Die Aufgabe der DKE ist es, Normen im Bereich der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik zu erarbeiten und zu veröffentlichen. Gemäß Vertrag der Bundesregierung mit dem DIN ist für die Normungsarbeit in der Bundesrepublik Deutschland das DIN die zuständige Organisation. Im Laufe der Jahre haben sich bestimmte Verfahrens- und Gestaltungsregeln gebildet, bei deren Einhaltung die Arbeitsergebnisse der DIN-Ausschüsse die notwendige Anerkennung aller Kreise finden. Soweit die Sicherheitsnormen des VDE-Vorschriftenwerks betroffen sind, die ausschließlich von der DKE erarbeitet werden, wurden diese Regeln mit dem VDE abgestimmt.

14.2.3 DKE-Normungsarbeit

Die DKE (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE) ist die in Deutschland zuständige Organisation für die Erarbeitung von Normen und Sicherheitsbestimmungen im Bereich der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik. Sie vertritt die deutschen Interessen in den Internationalen bzw. Europäischen Normungsorganisationen IEC und CE-NELEC und arbeitet als Nationale Normungsorganisation (NSO) zusammen mit ETSI (European Telecommunications Standards Institute) (**Bild 14.4**).

Aufgaben der DKE:

1. Anerkannte Regeln der Technik erarbeiten und veröffentlichen (DIN-Normen)
2. Normen mit Sicherheitsfestlegungen erhalten eine VDE-Klassifikation!
3. Mitarbeit bei der Veröffentlichung regionaler und internationaler Spezifikationen

Ziele der DKE:

1. Sichere und rationelle Erzeugung, Verteilung und Nutzung der Elektrizität, zum Wohle der Allgemeinheit.
2. Vertretung der deutschen Interessen bei der Weiterentwicklung der Internationalen und Europäischen Normen zum Abbau von Handelshemmnissen und zur weltweiten Öffnung der Märkte.
3. Beschleunigte Marktdurchdringung neuer Technologien durch Unterstützung der Informationsprozesse mittels Normen und Spezifikationen.

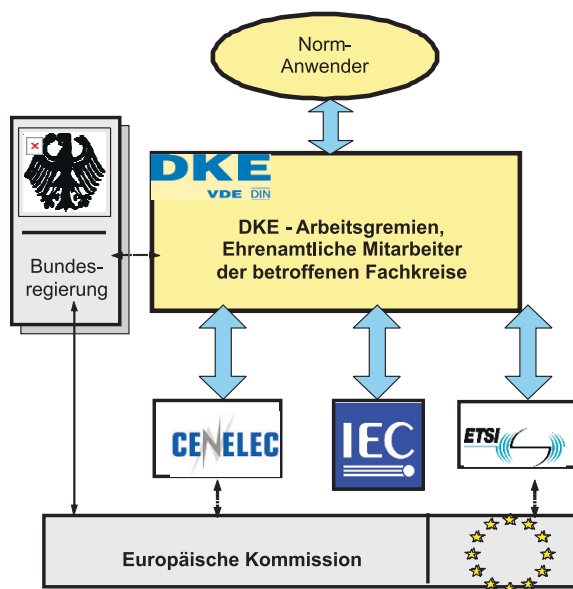


Bild 14.4: DKE-Normungsarbeit

14.2.4 Arbeitsgruppen (Working Groups)

Im DIN setzen sich Hersteller, Handel, Verbraucher, Handwerk, Dienstleistungsunternehmen, Wissenschaft, technische Überwachung, der Staat und weitere Personengruppen mit Interesse an der Normung, zusammen, um den Stand der Technik zu ermitteln und unter Berücksichtigung neuer Erkenntnisse Deutsche Normen niederzuschreiben. Technische Normung ist eine Aufgabe der Selbstverwaltung der an der Normung interessierten Kreise. Die Normungsarbeit wird von technischen Experten durchgeführt. Die Fachleute werden von Fachkreisen autorisiert, die an der Normungsarbeit interessiert sind (Fachkreise werden durch Verbände, Behörden, Hochschulen usw. repräsentiert). Die Fachkreise müssen in den Normungsgremien angemessen vertreten sein. Dies gilt besonders bei der Erarbeitung von Sicherheitsnormen. Die Arbeitsergebnisse müssen der Öffentlichkeit vorgestellt werden. Die Stellungnahmen der Öffentlichkeit sind Teil der Normungsarbeit und dementsprechend zu berücksichtigen. Unterschiedliche Auffassungen zu Norm-Entwürfen von Stellungnehmenden und Arbeitsgremien können im Rahmen einer Schlichtung und wenn diese misslingt, in einem Schiedsverfahren geklärt werden. Für die Realisierung dieser Voraussetzungen und die Kontrolle der Einhaltung aller Verfahrensregeln ist die Existenz einer dazu fähigen und anerkannten Institution notwendig.

14.2.5 VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informatik e.V.

Der VDE wurde im Jahr 1893 gegründet. Er ist ein technisch-wissenschaftlicher Verein. Die dem Namen des Verbandes vorangestellte und einen Bestandteil desselben bildende Buchstabenfolge VDE, ursprünglich nur die Kurzbezeichnung des Verbandes Deutscher Elektrotechniker, ist heute ein markenrechtlich geschütztes Verbandszeichen (Kollektivmarke). Diese Buchstaben kennzeichnen die Sicherheitsnormen der Elektrotechnik (VDE-Bestimmungen, VDE-Leitlinien und VDE-Vornormen). Sie sind ebenfalls im VDE-Zeichen enthalten, ein die Sicherheit angegebendes Zeichen für elektrotechnische Erzeugnisse mit weltweiter Bedeutung. Die Aufgaben des VDE in Deutschland werden von zur Zeit 32 Regional- und Bezirksvereinen in der Bundesrepublik Deutschland wahrgenommen. Die Bezirksvereine nehmen fachliche und auch allgemeine, am Ingenieurberuf orientierte Aufgaben wahr und betreuen dabei ihre persönlichen Mitglieder und korporativen Mitglieder. Sie planen und organisieren Veranstaltungen und schaffen den Rahmen für das Knüpfen persönlicher Kontakte und den Erfahrungsaustausch zwischen Fachkollegen auch unterschiedlicher Disziplinen in und im Umfeld der Elektrotechnik. Viele Aktivitäten der Bezirksvereine erfolgen in Abstimmung mit den fünf Fachgesellschaften, d.h. mit wechselseitiger Unterstützung.

Für die Errichtung und den Betrieb elektrischer Anlagen sowie für die Herstellung elektrischer Geräte gibt es viele Gesetze, Verordnungen, Vorschriften und Bestimmungen. Die Wichtigsten aus diesem Bereich sind:

1. Gesetz über Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz-EnWG)
2. Gesetz über technische Arbeitsmittel-Gerätesicherheitsgesetz (GSG)
3. Unfallverhütungsvorschriften der gewerblichen Berufsgenossenschaften
4. Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Elektrizitätsversorgung von Tarifkunden (AVBEltV)
5. Technische Anschlussbedingungen (TAB)
6. Hauptberatungsstelle für Elektrizitätsanwendung e.V. (HEA)
7. DIN-VDE-Normen, DIN-Normen
8. Merkblätter der Überwachungsvereine
9. Vorschriften und Merkblätter der Versicherungswirtschaft (VdS)
10. Baurecht, Bauplanungsrecht
11. Bürgerliches Recht und Strafrecht
12. Landesbauordnungen der Bundesländer

14.2.6 DIN-VDE-Normen

Elektrische Anlagen müssen so ausgeführt und betrieben werden, dass der Personen-, Tier- und Sachschutz gewährleistet wird. Das VDE-Vorschriftenwerk besteht aus:

1. Gruppe 0: Allgemeine Grundsätze
2. Gruppe 1: Energieanlagen (z.B. DIN VDE 0100)
3. Gruppe 2: Energieleiter (z.B. DIN VDE 0250)
4. Gruppe 3: Isolierstoffe
5. Gruppe 4: Messen, Steuern, Prüfen
6. Gruppe 5: Maschinen, Umformer
7. Gruppe 6: Installationsmaterial, Schaltgeräte
8. Gruppe 7: Gebrauchsgeräte, Arbeitsgeräte
9. Gruppe 8: Informationstechnik

14.2.7 Institutionen, Verordnungen, Gesetze, Normen und technische Vorschriften

Bautechnischer Brandschutz:

Landesbauordnung für Baden-Württemberg (LBO) Abs. 15, (Länderrecht) Musterbauordnung (MBO) Abs. 17 (Bundesrecht) und Musterbauordnung (Bund).

Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch im Interesse der Abwendung von Gefahren für Leben und Gesundheit von Menschen und Tieren vorgebeugt wird und bei einem Brand wirksame Löscharbeiten und die Rettung von Menschen und Tieren möglich sind. Die Leitungsanlagen-Richtlinie (LAR) gilt für:

- Leitungsanlagen in Rettungswegen
- Funktionserhalt von Sicherheitsvorrichtungen
- Brandschottungen bei Durchbrüchen durch Brandwände

Richtlinien der Versorgungsbetreiber (NB) TAB

Richtlinien der Sachversicherer (VdS-Richtlinien)

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V (GDV)

VdS-Richtlinien sind kein Gesetz. Sachschutz steht im Vordergrund. Diese Richtlinien sind unverbindliche Empfehlungen und können nur im Rahmen eines Versicherungsvertrages vereinbart werden.

Rechtliche Bedeutung technischer Normen:

Technische Normen sind keine Rechtsnormen. Sie enthalten Regeln, die für eine allgemeine Anwendung bestimmt sind und jedermann zur Anwendung freistehen. Rechtliche Bedeutung erhalten technische Normen z.B. im Verhältnis von Vertragspartnern (z.B. VOB) als Erkenntnisquelle für Behörden und gerichtlichen Entscheidungen und durch ihre Integration in rechtliche Regelungen. Die Norm kann durch gesetzliche Regelungen verbindlich werden, z.B. durch

1. das Energiewirtschaftsgesetz
2. die Unfallverhütungsvorschriften
3. das Gerätesicherheitsgesetz

15 Planung von Elektroanlagen

In diesem Kapitel werden Planungsgrundlagen Schritt für Schritt aufgezeigt und die dazu gehörenden Normen erläutert [11], [24], [25], [26], [27].

15.1 Art der Einspeisung

Verbraucher können auf verschiedene Art und Weise mit Energie versorgt werden. In der Praxis findet man drei mögliche Netzstrukturen (**Bild 15.1**). Normale Verbraucher werden über die allgemeine Stromversorgung versorgt. Anlagen, die im Gefahrenfall Personen schützen, werden über die Sicherheitsstromversorgung eingespeist. Sehr empfindliche Anlagen werden ununterbrochen automatisch über USV (unterbrechungsfreie Stromversorgung) versorgt.

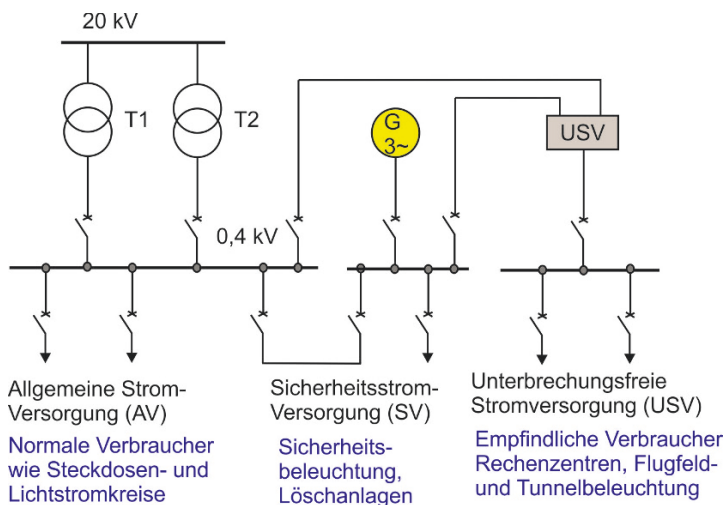


Bild 15.1: Art der Einspeisungen

Die Netzbelastung für Wohneinheiten kann an drei Stellen ermittelt werden (**Bild 15.2**).

1. Die maximale Leistung der Wohnung und der Gewerbe kann in der Vorplanung in kW/m^2 ermittelt werden.
2. Für die Belastbarkeit der Wohnung kann DIN 18015 benutzt werden.
3. Alle Wohnungen werden berücksichtigt, um die Bemessungsleistung des Transformators bzw. die Größe des Hausanschlusskastens (HAK) zu bestimmen. Wohngebäude bis ca. 100 Wohneinheiten können in der Regel über das Niederspannungsnetz des Netzbetreibers versorgt werden.

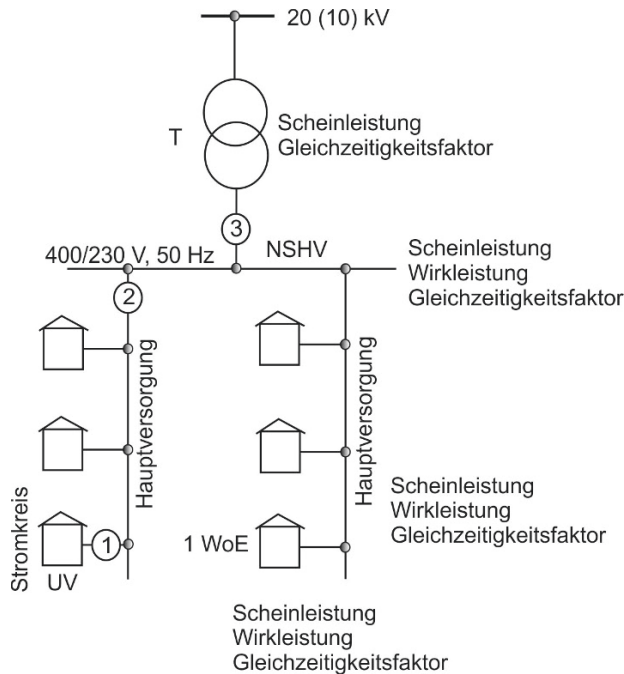


Bild 15.2: Belastung des Ortsnetzes

15.2 Leistungsbedarfsberechnung

Bei der Planung von Netzen und elektrischen Anlagen müssen frühzeitig insbesondere die Gesamtleistung der Anlage, die Größe und Anzahl der Transformatoren, die Dimensionierung von Kabeln und Leitungen, die Größe und Verteilung von Betriebs- und Kurzschlussströmen, mögliche Betriebsstörungen sowie die Lage und Größe des Hausanschlusskastens, des Elektroraumes und der Steiggeschächte oder auch Lastveränderungen geklärt werden. Die thermischen und dynamischen Kurzschlussströme sowie das Einschalt- und Ausschaltvermögen der Schutzgeräte, die Beiträge von Niederspannungsmotoren zum Anfangs-Kurz-

schlusswechselstrom, zum Stoßkurzschlussstrom und zum Ausschaltstrom, der Spannungsfall und die Netzrückwirkungen bestimmen die Festigkeit der Anlage. Elektrische Geräte müssen so beschaffen sein, dass ihr Betrieb durch elektromagnetische Einflüsse von außen nicht beeinträchtigt wird und sie selbst nicht zur Störquelle für andere Geräte werden. Deshalb muss man sich bei der Projektierung von Anlagen frühzeitig über mögliche Störquellen informieren und dagegen Maßnahmen treffen. Zur Planung einer Niederspannungsanlage gehören folgende charakteristische Angaben:

- Versorgungsart,
- übertragbare Leistung,
- Gleichzeitigkeitsfaktor,
- Systemformen,
- äußere Einflüsse auf Betriebsmittel,
- maximale Übertragungslänge,
- Anzahl der Anschlussgeräte,
- Querschnitte für die Abgänge,
- Absicherung der Stromkreise,
- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und Wartbarkeit.

Die Planung und Errichtung einer elektrischen Anlage setzt die sorgfältige Berechnung des Leistungsbedarfs voraus, für den die Anlage auszulegen ist. Er wird bestimmt durch

$$P_{max} = \sum (P_i g_i) \quad (15.1)$$

Der Gleichzeitigkeitsfaktor oder Bedarfsfaktor g_i gibt an, wieviele Verbraucher gleichzeitig elektrische Leistung in Anspruch nehmen (**Tabellen 15.4.2 und 15.3**). Er ist ein wichtiger Faktor zum Bestimmen von Einspeisungen. Wenn eine Anlage motorische Antriebe enthält, sind zusätzlich der Auslastungsfaktor a_i und der Wirkungsgrad η_i in die Berechnung einzubeziehen. Der maximale Leistungsbedarf ist dann [84]:

$$P_{max} = \sum \frac{P_{rM} g_i a_i}{\eta_i} \quad (15.2)$$

Die Energieversorgung darf nicht durch einen Fehler unterbrochen werden. Für diesen Fall ist die Einhaltung der Redundanz, nach dem **((n-1)-Ausfallprinzip)** gefordert. Die erforderliche Bemessungsleistung des Transformators kann mit folgender Beziehung berechnet werden:

$$S_{zul}(n-1) \leq \frac{(n-1) k \sum_{i=1}^n S_{rT_i}}{n} \quad (15.3)$$

Die Scheinleistung der Netzeinspeisung lässt sich mit dem berechneten P_{max} und dem mittleren Leistungsfaktor $\cos \varphi$ ermitteln. Nachdem die Gesamtleistung mit Reserve bestimmt wurde, können Größe und Typ des Transformators festgelegt werden.

$$S_{max} = \frac{P_{max}}{\cos \varphi} \quad (15.4)$$

Es bedeuten:

P_{max}	Leistungsbedarf,
P_i	installierte Leistung,
g_i	Gleichzeitigkeitsfaktor,
a_i	Auslastungsfaktor der Motoren,
η_i	Wirkungsgrad des Motors,
P_{rM}	Bemessungsleistung des Motors
S_{rT_1}	Transformatorbemessungsleistung
n	Anzahl der installierten Transformatoren
$S_{zul}(n-1)$	zulässige Leistung zur Beherrschung des (n-1)-Prinzips
k	Belastbarkeitsfaktor von Transformatoren (1,4 bei GEAFOL-Gießharztransformatoren).

Bei der Planung müssen auch mögliche Einwirkungen oder Einflüsse von elektrischen Betriebsmitteln auf andere Betriebsmittel und die Umgebung berücksichtigt werden. Zu beachten sind z.B. Oberschwingungen, Blindleistungskompensation, Überspannungen, elektromagnetische Felder, Spannungsqualität und Netzschutz. Die elektrischen Betriebsmittel, wie Kabel und Leitungen, Sicherungen, Leistungsschalter und Transformatoren sind so auszuwählen und zu bemessen, dass sich ein wirtschaftliches und technisches Optimum ergibt.

Nach DIN 18015 beträgt die Mindestabsicherung einer Wohnungsinstallation 63 A. Für größere Gebäudeinstallationen mit oder ohne elektrische Warmwasserbereitung für Bade- oder Duschzwecke sind die effektiven Leistungen zur Bemessung der Hauptleitungen **Bild 15.3** und **15.4** zu entnehmen.

- Mit elektrischer Warmwasserbereitung und Elektroheizung,
- mit Speicher für elektrische Warmwasserbereitung für Bade- und Waschw Zwecke, oder mit Durchlauferhitzer für elektrische Warmwasserbereitung für Bade- und Waschw Zwecke,
- ohne elektrische Warmwasserbereitung für Licht und Kleingeräte.

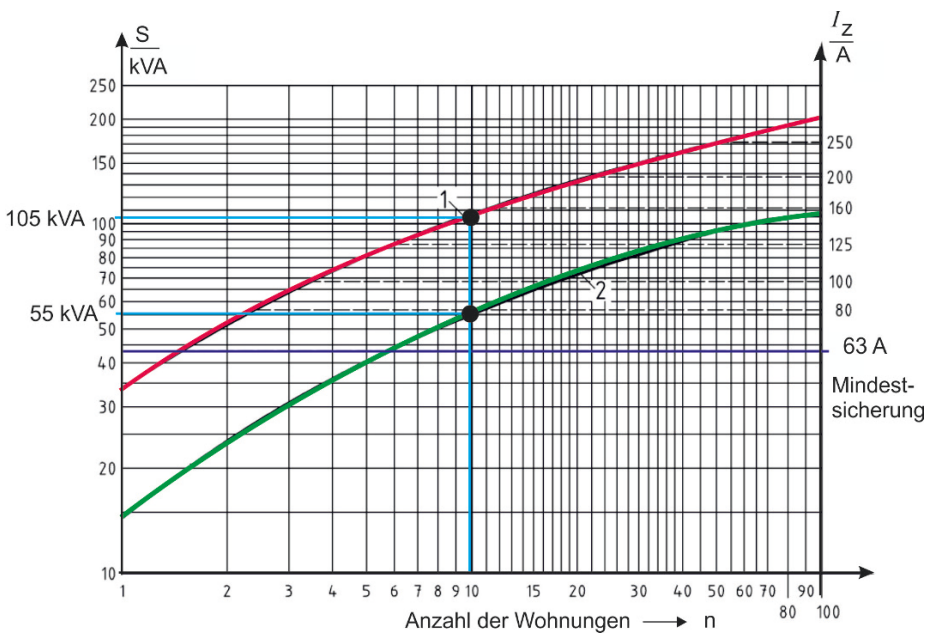


Bild 15.3: Bemessung der Gesamtleistung und der Hauptleitungen in Gebäuden
1) mit elektrischer Warmwasserbereitung 2) ohne elektrischer Warmwasserbereitung

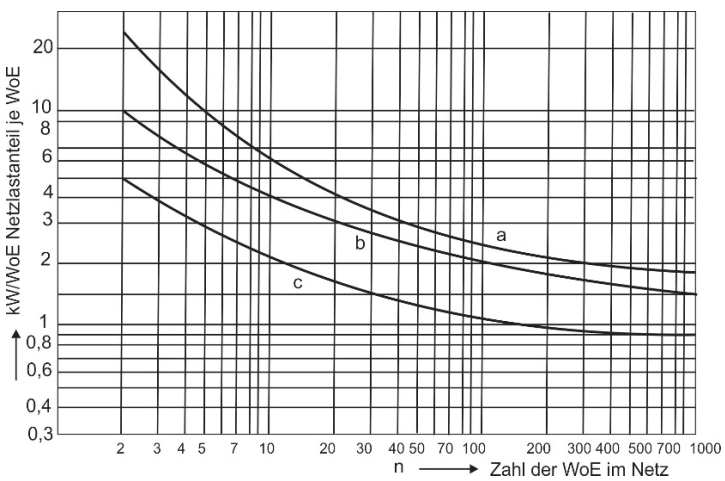


Bild 15.4: Netzanteil je Wohneinheit [51]
a) mit Durchlauferhitzer b) mit Speicher c) mit Licht- und Steckdosen

Jede Projektierungsaufgabe beginnt mit der Sammlung aller notwendigen Daten, die man zur Berechnung und zum Entwurf benötigt. Die Koordination zwischen allen Beteiligten (Bauherr, Architekt, Planer für Starkstrom-, Kommunikations-, Mess- und Regeltechnik-, Aufzugs-Anlagen wie auch für technische und technologische Anlagen) spielt eine wichtige Rolle. Einschlägige Normen und Vorschriften wie IEC, EN, DIN VDE oder besondere Vorschriften der Länder müssen immer beachtet werden.

Einige der wichtigsten Vorschriften sind:

- DIN VDE 0100 Errichten von Starkstromanlagen bis 1000 V
- DIN EN 60909-0 Berechnung der Kurzschlussströme in DS-Netzen
- DIN VDE 0100-710 Medizinisch genutzte Räume
- DIN VDE 0100-718 Starkstromanlagen und Sicherheitsstromversorgung in baulichen Anlagen für Menschenansammlungen
- DIN VDE 0113 (DIN EN 60204-1) Ausrüstung von Industriemaschinen
- DIN VDE 0165 Errichten elektrischer Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen
- IEC 62305, DIN EN 62305 (VDE 0185) Blitzschutzanlagen
- DIN VDE 0298 Strombelastbarkeit von Leitungen und Kabeln
- DIN VDE 0276-1000 Umrechnungsfaktoren für die Strombelastbarkeit von Leitungen und Kabeln
- BGV A2 Berufsgenossenschaftliche Vorschriften für Sicherheit und Gesundheit
- DIN 18015 Teile 1, 2 und 3, Planung von elektrischen Anlagen in Wohngebäuden
- Vorschriften des GVD (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V)
- TAB Technische Anschlussbedingungen
- DIN EN 12464-1, 5035-7 Beleuchtungstechnik
- Landesbauordnungen der Bundesländer
- DIN EN 60617 Schaltzeichen
- DIN 18012 Hausanschluss
- DIN 18014 Fundamente der
- Energiewirtschaftsgesetz.

Für die Planung und Projektierung von Gebäuden unterscheidet man in der Praxis folgende Fälle:

Fall I: einfache Betrachtung

1. Die Verbraucher und die Anschlussorte sind bekannt.
2. Der Gleichzeitigkeitsfaktor ist gegeben oder den Tabellen zu entnehmen.
3. Die Leistung und die Kurzschlussspannung des Transformators sind gegeben.
4. Der Kurzschlussstrom ist bekannt oder der Netzbetreiber gibt ihn an.
5. Man kann damit den Querschnitt der Hauptzuleitung, die Kurzschlussströme und die Spannungsfälle berechnen.

Fall II: ausführliche Betrachtung

1. Die Vorimpedanz des vorgelagerten Netzes und die Länge bis zur Einspeisung der Hauptverteilung sind gegeben.
2. Die Verbraucherdaten sind bekannt und werden in den Grundrissplan eingezeichnet.
3. Der Gleichzeitigkeitsfaktor ist gegeben.
4. Die Schutzmaßnahme TN- oder TT-System ist bekannt.
5. Die installierten Gesamtwirk- und -blindleistungen sind zu berechnen.
6. Aus der Gesamtwirkleistung ist der Betriebsstrom zu berechnen.
7. Unter Beachtung der Verlegeart und des Spannungsfalls ist der Querschnitt der Zuleitung zu berechnen.
8. Für das ausgewählte Kabel ist die Hauptsicherung oder der Leistungsschalter zu bestimmen.
9. Für die Berechnung der Kurzschlussströme werden einzelne Impedanzen der Leitungen und Kabeln bestimmt.
10. Die Kurzschlussströme bei dreipoligem und einpoligem Kurzschluss werden berechnet.
11. Die Querschnitte der Leitungen und Kabel sind unter Beachtung der Vorschriften (DIN VDE 0100 Teile 410, 430, 520, 540 sowie DIN VDE 0298 Teil 2 und 4 bzw. DIN VDE 0276 Teil 1000) zu bestimmen.
12. Die Überstrom-Schutzeinrichtungen (ÜSE) sind für diese Querschnitte auszuwählen.
13. Die Abschaltzeiten der einzelnen Sicherungen sind entweder aus den Kennlinien oder aus DIN VDE 0100 Gruppe 600 abzulesen.
14. Die Selektivität der Überstromschutzeinrichtungen ist zu prüfen.
15. Nunmehr können alle ermittelten Daten in Übersichts-, Schalt- und Grundrisspläne übertragen werden.

15.3 Grundlagen der Elektromobilität

Für den Anschluss von Ladevorrichtungen an das Niederspannungsnetz ist DIN VDE 0100-722 (VDE 0100-722) zu berücksichtigen. Wenn eine Lademöglichkeit für Elektrostraßenfahrzeuge vorgesehen wird, ist eine Zuleitung mit drei Außenleitern (3L, N, PE) und einer zulässigen Strombelastbarkeit von 32 A von der Hauptverteilung bzw. dem Zählerschrank zum Ladeplatz oder mindestens ein entsprechendes Installationsrohr vorzusehen. Zusätzlich zur Stromversorgung ist ein Installationsrohr für ein Netzkabel von der Hauptverteilung bzw. dem Zählerschrank zum Ladeplatz zu verlegen. Für zukünftige Anwendungen in Bezug auf Smart Grid und evtl. spezieller Abrechnungsmöglichkeiten beim Laden von Elektrostraßenfahrzeugen sollte im Verteiler Platz für weitere Reiheneinbaugeräte sowie für einen zusätzlichen Energiezähler vorgesehen werden. **Bild 15.5** zeigt einen Übersichtsschaltplan einer Ladeeinrichtung.

Mögliche Leistungen je nach Ladebetriebsart: maximal 1ph 16 A (3,7 kW), 3ph 16 A (11 kW) / 3ph 32 A (22 kW), 2ph 80 A [35]. Typische DC-Ladeleistungen liegen aktuell bei 50 kW. Der Gleichzeitigkeitsfaktor der Verteilerstromkreise ist mit 1 anzunehmen. Bei einer Laststeuerung kann sich dieser Faktor reduzieren.

Zur Vermeidung von Personen- und Sachschäden gemäß DIN VDE 0100-443 ist der Schutz gegen Überspannungen infolge atmosphärischer Einflüsse und für die Auswahl der geforderten Überspannungsschutzeinrichtungen DIN VDE 0100-534 zu beachten [36].

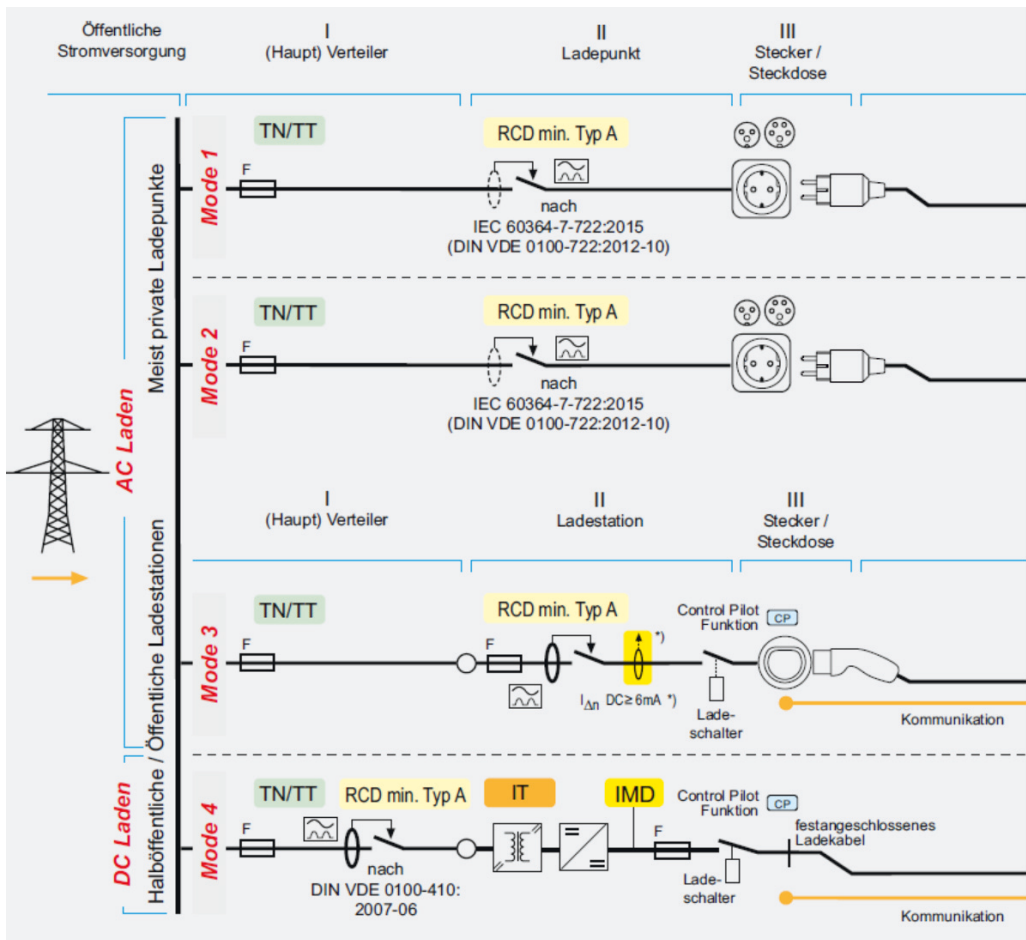


Bild 15.5: Übersichtsschaltplan einer Ladeeinrichtung [35]

Voraussetzungen der Elektroinstallation sind:

Nach DIN VDE 0100-722 (IEC 60364-7-722) muss jeder Ladepunkt mit einer eigenen Fehlerstromschutzeinrichtung mit einem Bemessungsfehlerstrom $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$ geschützt werden. Für Ladepunkte mit einer Steckvorrichtung nach IEC 62196 sind zudem Maßnahmen zum Schutz bei Auftreten von glatten Gleichfehlerströmen $i_{FDC} = 6 \text{ mA}$ zu treffen (z.B. RCD Typ B). Die ausgewählte Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) muss mindestens vom Typ A sein und alle aktiven Leiter einschließlich des Neutralleiters abschalten. Wenn eine Steckvorrichtung nach IEC 62196 verwendet wird, dann muss ein RCD Typ B oder ein Typ A mit Sondererkennung von Gleichfehlerströmen $> 6 \text{ mA}$ verwendet werden.

Für die Versorgung von Elektrofahrzeugen stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung [36]:

1. Wechselstromladung (AC Laden): Das Fahrzeug wird mit dem ein- bzw. dreiphasigen Wechselstromnetz über ein geeignetes Ladesystem und eine Ladeleitung verbunden. Das im Fahrzeug eingebaute Ladegerät übernimmt die Gleichrichtung und steuert das Laden der Batterie.
2. Gleichstromladung (DC Laden): Das Fahrzeug benötigt eine Verbindung mit der Ladestation über eine Ladeleitung, wobei das Ladegerät in der Ladestation integriert ist. Die Steuerung des Ladens erfolgt über eine Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation.
3. Induktive Ladung: Ladung erfolgt mithilfe des Transformatorprinzips. Diese Technologie befindet sich für Elektrofahrzeuge aktuell noch in der Entwicklung und Standardisierung.

15.4 Elektrische Anlagen in Wohngebäuden

DIN 18015-1-2-3-4 gilt für die Planung von elektrischen Anlagen in Wohngebäuden (z. B. Mehrfamilienhäuser, Reihenhäuser, Einfamilienhäuser) sowie mit diesen im Zusammenhang stehenden elektrischen Anlagen außerhalb der Gebäude, ausgenommen die Ausstattung der technischen Betriebsräume und der betriebstechnischen Anlagen. Sie gilt auch für Wohngebäude mit teilgewerblicher Nutzung. Die Teile dieser Norm werden in diesem Abschnitt beschrieben.

15.4.1 Begriffe

Kundenanlage: Elektrische Anlage hinter dem Übergabepunkt eines vorgelagerten Verteilungsnetzes.

Verteilungsnetz: Gesamtheit aller Anlagen, Leitungen und Kabel des vorgelagerten Netzes bis zum Übergabepunkt zur Kundenanlage (Verbraucheranlage).

Netzbetreiber: sind Betreiber eines Elektrizitätsversorgungsnetzes, Telekommunikationsnetzes, Breitbandkommunikationsnetzes, Versorgungsnetzes, Verteilungsnetzes oder Fernnetzes für Gas im Sinne des Energiewirtschaftsgesetzes, Übertragungs- oder Verteilungsnetzes für Fernwärme oder Fernkälte.

15.4.2 Elektrische Anlagen in Wohngebäuden DIN 18015 Teil 1 - Planungsgrundlagen

Diese Norm gilt für die Planung von elektrischen Anlagen in Wohngebäuden sowie mit diesen im Zusammenhang stehenden elektrischen Anlagen außerhalb der Gebäude. Für Gebäude mit vergleichbaren Anforderungen an die elektrische Ausrüstung ist sie sinngemäß anzuwenden.

Elektrische Anlagen in Wohngebäuden bestehen aus folgenden Teilen:

- Teil 1: Planungsgrundlagen
- Teil 2: Art und Umfang der Mindestausstattung
- Teil 3: Leitungsführung und Anordnung der Betriebsmittel
- Teil 4: Gebäudesystemtechnik

Im Rahmen der Projekt- und Planungsvorbereitung sind die Anschlussvoraussetzungen mit dem jeweiligen Netzbetreiber zu klären. Für Installationspläne elektrischer Anlagen sind die grafischen Symbole nach den Normen der Reihe DIN EN 60617 und DIN EN 61082-4 zu verwenden. Es ist zweckmäßig, Planungsunterlagen für die elektrische Anlage nach der Ausführung an den aktuellen Stand anzupassen.

Elektrische Anlagen in Wohngebäuden sind:

1. Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V,
2. Telekommunikationsanlagen und Hauskommunikationsanlagen sowie sonstige Melde- und Informationsverarbeitungsanlagen,
3. Verteilanlagen für Radio und Fernsehen sowie für interaktive Dienste mit oder

ohne Anschluss an ein allgemein zugängliches Netz eines Netzbetreibers,

4. Blitzschutzanlagen und
5. Gebäudesystemtechnik(KNX/EIB-weltweiter Standard für Haus- und Gebäudesystemtechnik).

Für die Dimensionierung der Energieversorgung und der Hauptleitung muss der Leistungsbedarf des Gebäudes frühzeitig ermittelt werden. Neben der maximalen Anschlussleistung sind noch die einzelnen Funktionsbereiche wie z.B. Büro, Parkplatz und Ladengeschäft zu ermitteln.

Die in den folgenden **Tabellen 15.1** bis **Tabelle 15.7** angegebenen Leistungswerte und Gleichzeitigkeitsfaktoren (**glz**) können eingesetzt werden, wenn keine genauere Daten vorliegen [2].

Tabelle 15.1: Anschlusswerte von Elektrogeräten

Betriebsmittel	Anschlusswert in W
Küche	
Kühlschrank	120
Gefriertruhe	140
Elektroherd	6000
Kochplatte	1500
Einbaubackofen	2500
Mikrowelle	1200
Grillgerät	2000
Dunstabzugshaube	220
Warmwasserboiler	2000
Geschirrspülmaschine	3400
Wasserkocher	2000
Kaffemaschine	750
Kaffemühle	110
Küchenmaschine	400
Klimagerät	3000
Toaster	1000
Friteuse	2000
Durchlauferhitzer	21000
Hauswirtschaft	
Waschmaschine	3300
Wäschetrockner	2500
Wäscheschleuder	200
Bügelmaschine	2000
Bügeleisen	1000
Trockner	2000
Nähmaschine	400
Rasenmäher	1000
Staubsauger	2000
Bad	
Haartrockner	1000
Durchlauferhitzer	21000
Sonnenbänke	1500
Warmwasserspeicher	2000
Wohnen	
Fernsehgerät	180
Radiogerät	50
Plattenspieler	40
Tonbandgerät	80
Tauchsieder	2000
Stereoanlage	80
Innenleuchten	60-100
Büro	
Schreibmaschine	500
Kopiergerät	1400
Computeranlage	500
Heizgeräte	
Heizstrahler	2000
Speicherheizgeräte	4000
Wärmepumpen	2500
Klimagerät, Klimatruhe	2000

Tabelle 15.2: Gleichzeitigkeitsfaktoren für die Haupteinspeisung

Gebäudeart	Faktor
Wohngebäude	0,4
Wohnblocks	
mit elektr. Heizung	0,8-1
ohne elektr. Heizung	0,6
Bürohochhaus	
Lüftung, Heizung	1
Datenverarbeitung	1
Beleuchtung	1
Sprinkleranlage	1
Sanitäranlage	0,8
Aufzüge	0,7
Kälteanlage	1
Schulen	0,6-0,7
Versammlungsräume, Theater, Restaurants usw.	0,6-0,8
Ladengeschäfte	0,6-0,7
Verkehrsanlagen	1
Verwaltungs- gebäude, Banken	0,7-0,9
Kindergärten	0,6-0,9
Schreinereien	0,2-0,6
Metzgereien	0,5-0,8
Bäckereien	0,4-0,8
Baustellen	0,2-0,4
Kräne	0,7 je Kran

Tabelle 15.3: Gleichzeitigkeitsfaktoren für wichtige Verbrauchergruppen

Verbraucher- gruppen	Bürogebäude	Krankenhäuser	Kaufhäuser
Beleuchtung	0,85-0,95	0,7-0,9	0,85-0,95
Steckdosen	0,1-0,15	0,1-0,2	0,2
Küchen	0,5-0,85	0,6-0,8	0,6-0,8
Klimaanlagen	1	1	1
Aufzüge, Rolltreppen	0,7-1	0,5-1	0,7-1

Tabelle 15.4: Richtwerte für Gleichzeitigkeitsfaktoren

Anzahl der Wohnungen	Gleizeitigkeitsfaktor in %
3-5	45
6-10	43
11-15	41
16-20	39
21-25	36
26-30	34
31-35	31
36-40	29
41-45	28
46-50	26
51-55	25
56-61	24
> 62	23

Tabelle 15.5: Belastbarkeit der Hauptleitung gemäß DIN 18015 Teil 1

Ohne elektrische Warmwasserbereitung	
Wohneinheiten	Sicherungsgröße [A]
1-5	63
6-10	80
11-18	100
19-36	125
37-100	160
Mit elektrischer Warmwasserbereitung	
1	63
2	80
3	100
4-6	125
7-11	160
12-22	200
23-48	250

Tabelle 15.6: Leistungsbedarf von Gebäuden

Gebäude nach Nutzung	Durchschnittlicher Leistungsbedarf in W/m ²	glz	Kosten in Euro/m ³
Bank	40-70	0,6	25-50
Büro	30-50	0,6	17-40
Einkaufszentrum	30-60	0,6	12-35
Einfamilienhaus	10-30	0,4	-
Mehrfamilienhaus	10-30	0,4	18-35
Hotel	30-60	0,6	10-35
Kaufhaus	30-60	0,6	20-45
Krankenhaus	80-120	0,6	10-40
Kühlhalle	500-1500	0,6	10-20
Parkhaus	3-10	0,6	7-15
Rechenzentrum	500-1500	0,6	15-30
Schule	10-30	0,6	8-25
Turnhalle	15-30	0,6	8-25
Wohnheim/Altenpflege	15-30	0,6	10-25

Tabelle 15.7: Leistungsbedarf verschiedener Funktionsbereiche und Räume von Gebäuden

Funktionsbereiche	Durchschnittlicher Leistungsbedarf in W/m ²	glz
Flur/Vorraum	5-15	0,3
Treppenhaus	5-15	0,3
Technik allgemein	5-15	0,3
Empfangshalle	10-30	1
Aufenthaltsraum/Teeküche	20-50	0,3
WC-Bereiche	5-15	1
Reisezentrum	60-80	0,8
Büroflächen	20-40	0,8
Presse/Buchhandel	80-120	0,8
Blumen	80-120	0,8
Bäcker/Fleisch/Wurst	250-350	0,8
Obst/Gemüse	80-120	0,8
Bistro/Eiscafe	150-250	0,8
Imbiss	180-220	0,8
Gastronomie/Restaurant	180-400	0,8
Frisör	220-280	0,8
Reinigung/Wäscherei	700-950	0,7
Lagerfläche	5-15	0,3
Küchen	200-400	0,7
Photovoltaik Module	200-300	

15.4.3 Elektrische Anlagen in Wohngebäuden DIN 18015

Teil 2: Art und Umfang der Mindestausstattung

Diese Norm gilt für die Art und den Umfang der Mindestausstattung elektrischer Anlagen in Wohngebäuden (z. B. Mehrfamilienhäuser, Reihenhäuser, Einfamilienhäuser), ausgenommen die Ausstattung der technischen Betriebsräume und der betriebstechnischen Anlagen. Sie gilt auch für solche Anlagen, die mit Gebäudesystemtechnik ausgerüstet sind.

Der Übersichtschaltplan und der Verteilerplan der Anlage wird in **Bild 15.8** gezeigt. Bei dem Beispiel ist jeder Stromkreis mit einer LS/RCD kombiniert. **Bild 15.9** zeigt den Installationsplan des Elternzimmer und das **Bild 15.10** zeigt das Bad.

Symbol	Ausstattungs-wert	Wohnbereich																
	2																	
	Kennzeichnung																	
	★ ★	Küche ^{a) b)}	Kochfläche ^{b)}	Bad	WC-Raum	Hausarbeitsraum ^{b)}	Wohnzimmer ^{a)}	Esszimmer	je Schlaf-, Kinder-, Gäste-Arbeitszimmer, Büro ^{b)}	Flur	Freisitz	Abstellraum	Hobbyraum	zur Wohnung gehörender Keller-/Bodenraum, Garage	Keller-/Bodengang	je 6 m	Ganglänge	
Steckdosen, Anschlüsse		Anzahl der Steckdosen, Beleuchtungs- und Kommunikationsanschlüsse																
⏏	Steckdosen, allgemein	10	4	4 ^{g)}	2	8	8	11	5	8	11	2	3	2	2	6	2	1
⊗	Beleuchtungsanschlüsse	3	2	3	1	2	2	3	1	2	3	2	2 ^{g)}	2	1	2	1	1
📶	Telefon-/Datenanschluss (LuK)	1				1	1	2	1	1	2		1		1			
⏏	Steckdosen für Telefon/Daten	2				2	2	4	2	2	4		2		2			
📶	Radio-/TV-/Datenanschluss (RuK)	1				1	2	3	1		1			1		1		
⏏	Steckdosen für Radio / TV / Daten	3				3	6	9	3		3			3		3		
❄️	Kühlgerät, Gefriergerät	2	1															
💨	Dunstabzug		1															
🌀	Anschluss für Lüfter ^{c)}			1	1													
🌀	Rollladenantriebe																	
Besondere Verbrauchsmittel		Anzahl der Anschlüsse für besondere Verbrauchsmittel mit eigenem Stromkreis																
🔌	Elektroherd (3x230V)	1																
🔌	Backofen	1																
🔌	Dampfgarer	1																
🔌	Mikrowellenkochgerät	1																
🔌	Geschirrspülmaschine	1																
🔌	Waschmaschine ^{f)}			1		1											1	
🔌	Wäschetrockner ^{f)}			1		1											1	
🔌	Bügelstation, Dampfbügelstation					1												
🔌	Warmwassergerät ^{d)}	1	1	1														
🔌	Saunaheizgerät (3x230V)																	
🔌	Whirlpool																	
🔌	Heizgerät ^{d)}			1														
Stromkreisverteiler, Beleuchtungs- und Steckdosenstromkreise, Hauskommunikationsanlage		die Größe richtet sich nach der Anzahl der einzubauenden Betriebsmittel zzgl. Reserveplätze, in Mehrraumwohnungen mindestens vierreihige, in Einraumwohnungen mindestens dreireihige Stromkreisverteiler																
Stromkreisverteiler																		
Beleuchtungs- und Steckdosenstromkreise (zusätzlich zu den oben aufgeführten Stromkreisen für besondere Verbrauchsmittel)		1	1		1	1	2	1	1	2		1		1	1			
Hauskommunikationsanlage		Klingel oder Gong, Türöffner und Gegensprechanlage mit mehreren Wohnungssprechstellen																

- a) In Räumen mit Essecke ist die Anzahl der Anschlüsse und Steckdosen um jeweils 1 zu erhöhen.
b) Die den Bettplätzen und den Arbeitsflächen von Küchen, Kochflächen und Hausarbeitsräumen zugeordneten Steckdosen sind mindestens als Zweifach-Steckdosen vorzusehen. Sie zählen jedoch in der Tabelle als jeweils nur eine Steckdose.
c) Sofern eine Einzellüftung vorgesehen ist. Bei fensterlosen Bädern oder WC-Räumen ist die Schaltung über die Allgemeinbeleuchtung mit Nachlauf auszuführen.
d) Sofern die Heizung/Warmwasserversorgung nicht auf andere Weise erfolgt.
e) Davon ist eine Steckdose in Kombination mit der Waschtschleuchte zulässig.
f) In einer Wohnung nur jeweils einmal erforderlich.
g) Von mindestens zwei Stellen aus schaltbar.

Bild 15.6: Anzahl der Steckdosen, Auslässe und Anschlüsse (DIN 18015-2)

Ausstattungswert

Wohnbereich

2 plus

Kennzeichnung

★★ plus

Gefordert ist die Vorbereitung für die Anwendung dieser Funktionsbereiche durch Installieren von entsprechenden BUS-Leitungen oder entsprechenden Installationsröhren zur nachträglichen Installation von Busleuchtungen sowie die Auswahl eines Stromkreisverteilers mit entsprechendem Reserveplatz und die Umsetzung mindestens eines Funktionsbereiches.

Küche

Kochnische

Bad

WC-Raum

Hausarbeitsraum

Wohnzimmer

Esszimmer

je Schlaf-, Kinder-, Gäste-
Arbeitszimmer, Büro

Flur

Freisitz

Abstellraum

Hobbyraum

zur Wohnung gehörender
Keller-/Bodenraum, Garage

Keller-/Bodengang

je 6 m
Ganglänge

Funktionsbereich: Schalten/Dimmen (bezogen auf die Anzahl der Beleuchtungsanschlüsse)

Schalten ^{h)}	3	2	3	1	2	2	3	1	2	3	2	2	1	2	1	1
Status Schalten	3	2	3	1	2	2	3	1	2	3	2	2	1	2	1	1
Dimmen ^{h)}						2	3	1	2	3						
Status Dimmen						2	3	1	2	3						
Sperren																
Szene						1	2		1							
Bewegungsmeldung											1					
Anwesenheitserkennung ^{m)} (Präsenzmeldung)	1		1	1	1	1	1	1	1				1			

Funktionsbereich: Schaltbare Steckdosen / geschaltete Geräte / Energiemanagement
(in jedem Fall erforderlich, wenn Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung umgesetzt werden sollen)

Warmwassergerät	1		1	1												
Heizgerät			1													
Waschmaschine			1		1											
Geschirrspülmaschine	1															
Wäschetrockner			1		1											
Gefriergerät	1				1											

Funktionsbereich: Sonnenschutz

Auf/ab fahren, Stopp ^{l)}	1		1	1	1	1	1	1	1							
Position anfahren						1	1	1								
Status Position	1		1	1	1	1	1	1	1							
Sperren	1		1	1	1	1	1	1	1							
Szene						1	1	1								

Funktionsbereich: Heizen Lüften Kühlen

Raumtemperaturregler	1		1	1	1	1	1	1	1				1			
Ventilstellantrieb (je Heiz-/Kühlkreis)	1		1	1	1	1	1	1	1				1			
bedarfsgesteuerte Lüftung (CO ₂ /Feuchte-Sensor)	1		1	1	1	1	1	1	1				1			
Anwesenheitserkennung ^{m)} (Präsenzmeldung)	1		1	1	1	1	1	1	1				1			
Fensterkontakte ^{k)}																

je Fenster / Fassade vorzusehen

Funktionsbereich: Sicherheit

Fensterkontakte ^{k)}																
Brandmeldung	1				1	1	1	1	1				1			
Anwesenheitssimulation	1		1	1	1	1	1	1	1				1			
Anwesenheitserkennung ^{m)} (Präsenzmeldung)	1		1	1	1	1	1	1	1					1		
Bewegungsmeldung	1		1	1	1	1	1	1	1	1			1			

je Fenster / Fassade vorzusehen

h) Je Raumzugang.

k) Nur einmal für Funktionsbereich Heizen, Lüften, Kühlen und Funktionsbereich Sicherheit notwendig.

l) Je Fenster mit Sonnenschutz.

m) Nur einmal je Raum für alle Funktionsbereiche erforderlich.

h) Je Raumzugang.

k) Nur einmal für Funktionsbereich Heizen, Lüften, Kühlen und Funktionsbereich Sicherheit notwendig.

l) Je Fenster mit Sonnenschutz.

m) Nur einmal je Raum für alle Funktionsbereiche erforderlich.

Bild 15.7: Ausstattungswerte für Gebäudesystemtechnik (DIN 18015-2)

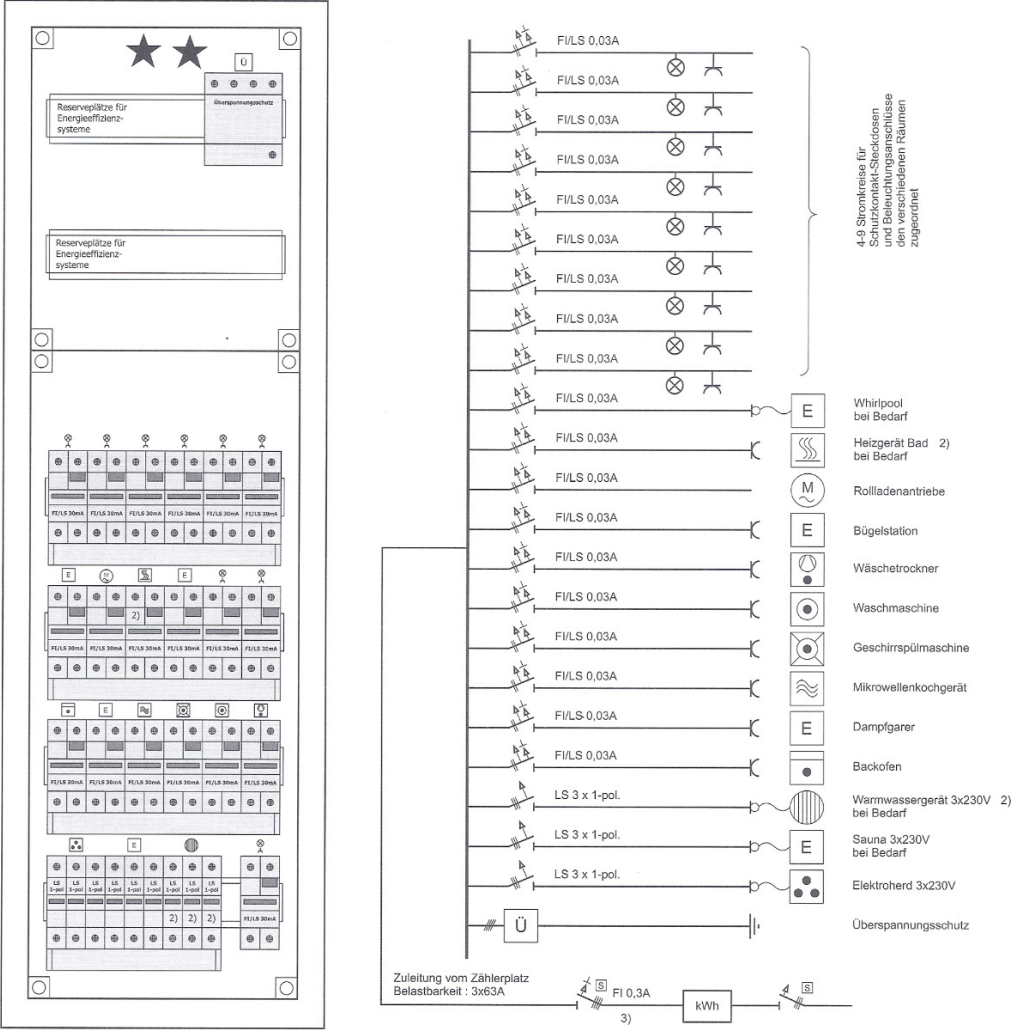


Bild 15.8: Bestückung von Verteilern und Stromkreiseinteilung (DIN 18015-2) und Größe der Unterverteiler, 1) Stromkreise über 50 m² 2) sofern erforderlich 3) im Zählerschrank

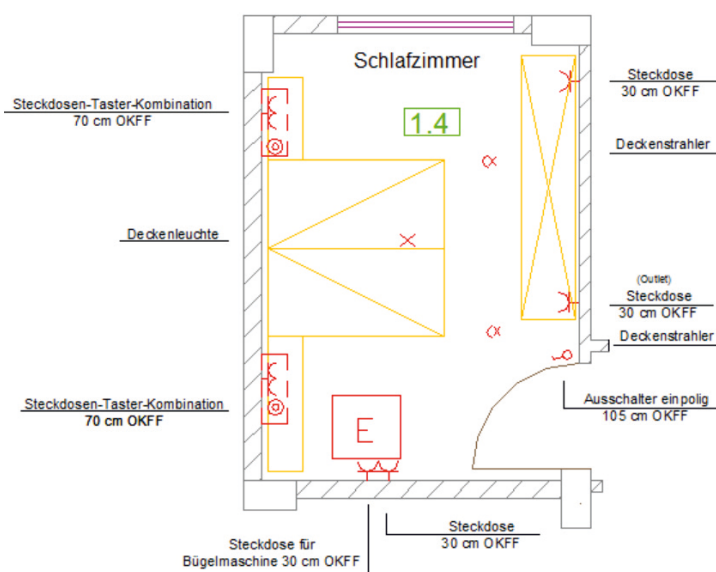


Bild 15.9: Installationsplan Schlafzimmer

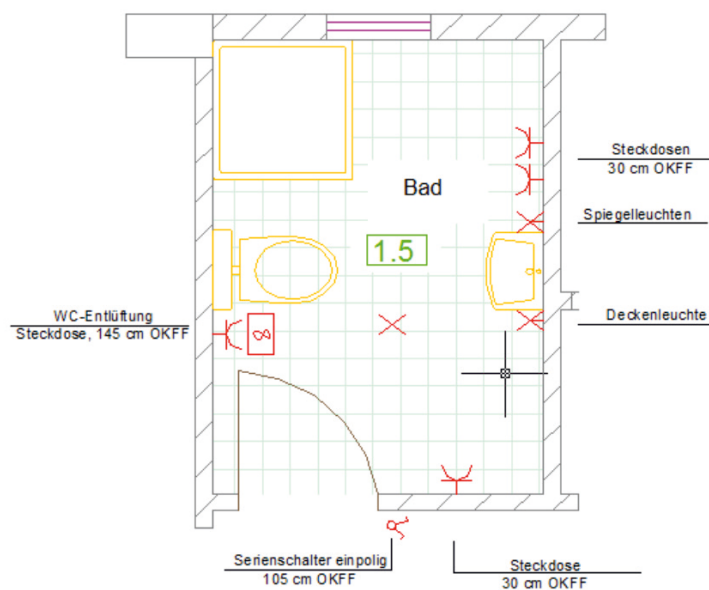


Bild 15.10: Installationsplan Bad

15.4.4 Elektrische Anlagen in Wohngebäuden DIN 18015

Teil 3: Leitungsführung und Anordnung der Betriebsmittel

Diese Norm gilt für die Installation von unter Putz angeordneten elektrischen Leitungen sowie Auslässen, Schaltern und Steckdosen elektrischer Anlagen, die nach DIN 18015-1 geplant werden. Sie gilt nicht für sichtbar installierte Leitungen (Aufputz-Installationen, Installationskanalsysteme) und nicht für Installationsdoppelböden nach DIN EN 12825.

Diese Norm hat den Zweck, die Anordnung von unsichtbar angeordneten elektrischen Leitungen auf bestimmte festgelegte Zonen zu beschränken, um bei der Installation anderer Leitungen, z.B. für Gas, Wasser oder Heizung, oder bei sonstigen nachträglichen Arbeiten an Wänden und Decken bzw. Fußböden die Gefahr einer Beschädigung der elektrischen Leitungen einzuschränken.

In der Normenreihe DIN 18025 sind von dieser Norm abweichende Festlegungen getroffen, die gegebenenfalls zu berücksichtigen sind. Auslässe, Schalter und Steckdosen sind vorzugsweise neben den Türen in senkrechten Installationszonen so anzuordnen, dass die Mitte des obersten Schalters nicht mehr als 105 cm über dem Fußboden liegt (**Bild 15.11**).

Nach der Normenreihe DIN 18025 sind bei barrierefreien Wohnungen abweichende Schalterhöhen festgelegt. Auch für den Abstand der Schalter zu den Türen sind andere Maße festgelegt. Steckdosen in der unteren waagerechten Installationszone sind in einer Vorzugshöhe von 30 cm über dem Fußboden anzuordnen (**Bild 15.11**). Steckdosen und Schalter über Arbeitsflächen vor Wänden sind innerhalb der mittleren waagerechten Installationszone in einer Vorzugshöhe von 115 cm über dem Fußboden anzuordnen (**Bild 15.12**).

Die elektrischen Leitungen sind innerhalb der festgelegten Installationszonen vorzugsweise mittig anzuordnen. Leitungen zu Stromkreisverteilern dürfen nur senkrecht zu den Verteilern geführt werden.

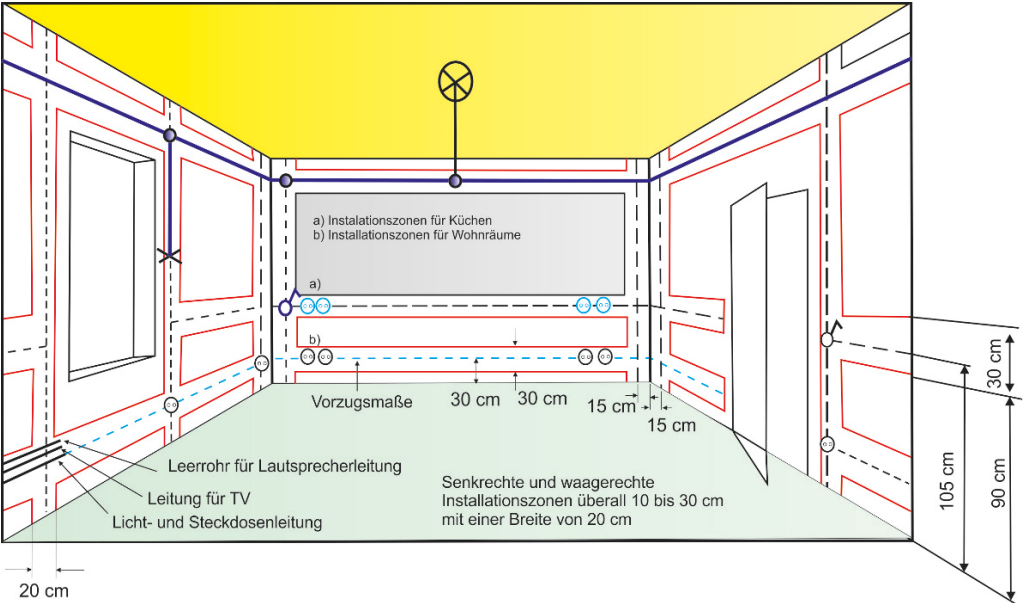


Bild 15.11: Senkrechte sowie obere und untere waagerechte Installationszonen

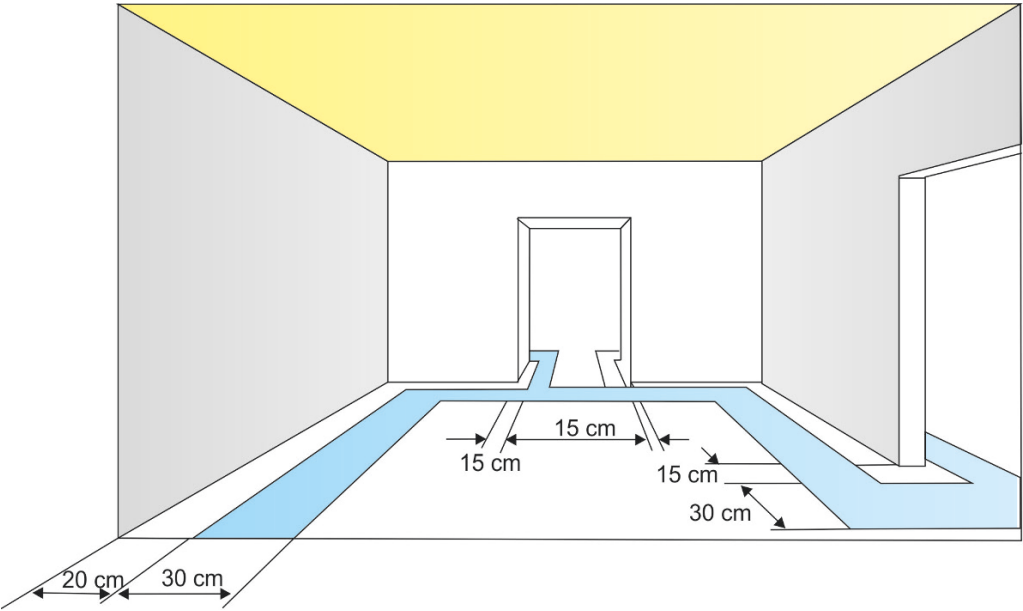


Bild 15.12: Leitungsführung auf der Decke bei ausschließlich elektrischen Leitungen

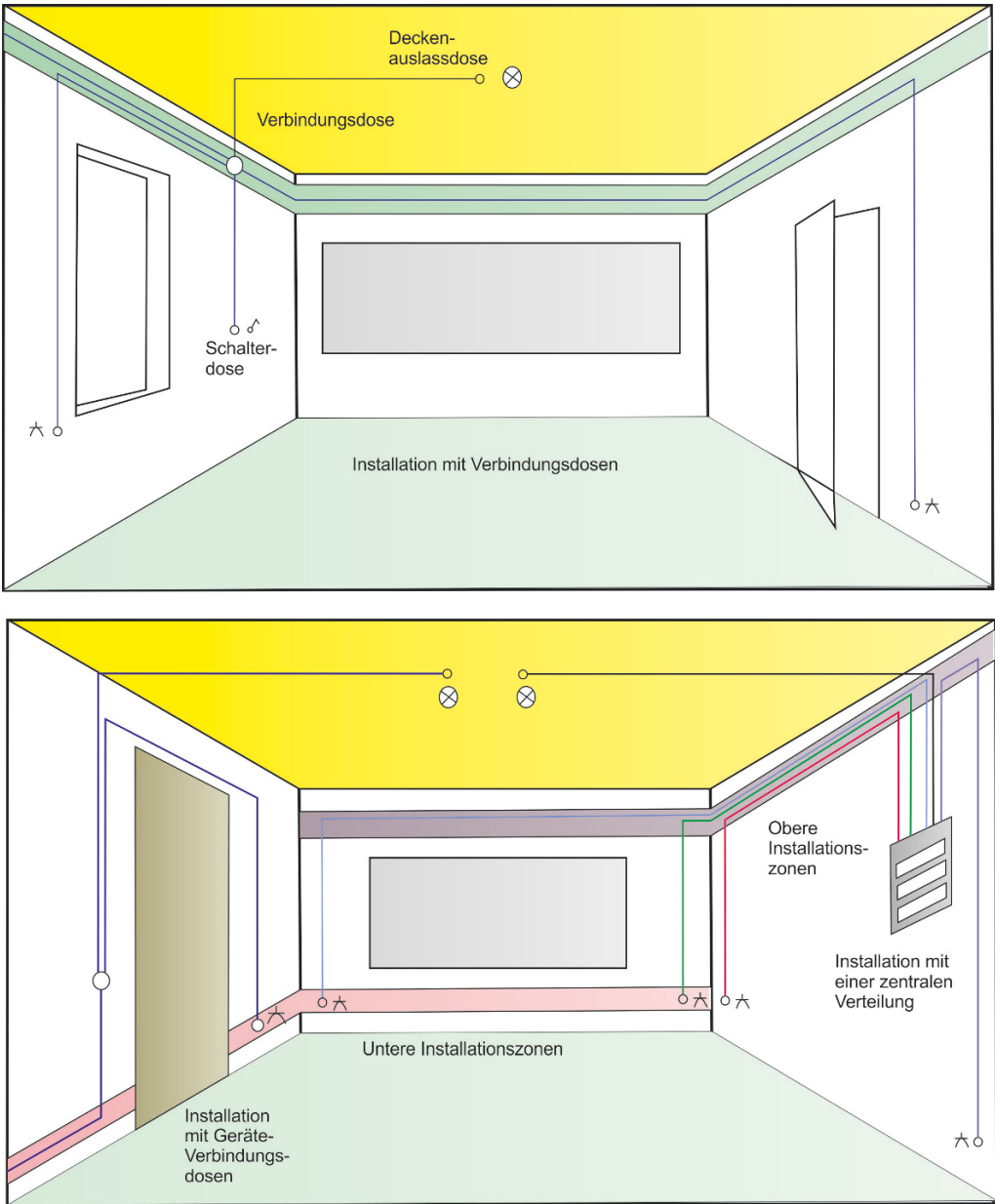


Bild 15.13: Installationszonen mit Verbindungs-dosen

15.5 Elektrotechnische Anforderungen

1. Jedes Wohnzimmer, Esszimmer, Schlafzimmer muss mit Steckdosen, gleichmäßig im Raum verteilt, ausgestattet werden.
2. Jede Wand muss mindestens über eine Steckdose verfügen.
3. Jeder Raum muss mit einem Schalter oder kombiniert mit einer Steckdose, die durch einen Schalter neben der Tür gesteuert wird, ausgestattet sein.
4. Fehlerstrom-Schutzeinrichtung sind unbedingt für Steckdosen erforderlich, die für Küchenarbeitsplatten, Bäder, Garagen und unfertigen Gebäuden oder Kellern installiert sind.
5. Bei der Konvertierung von Räumen in eine Garage kann ein zusätzlicher RCD-Anschluss erforderlich sein.
6. Badezimmer werden mit separatem RCD/30 mA versorgt werden.
7. Grundsätzlich müssen alle Steckdosenstromkreise durch RCD-Schutzschalter geschützt sein.

16 Installationstechnik

In diesem Kapitel werden folgende Themen behandelt [11, 28, 29, 30]:

1. gesetzliche, behördliche und privatrechtliche Regelungen und Normen,
2. Starkstromanlagen im Gebäude,
3. Vorgehensweise bei Planungsaufgaben.

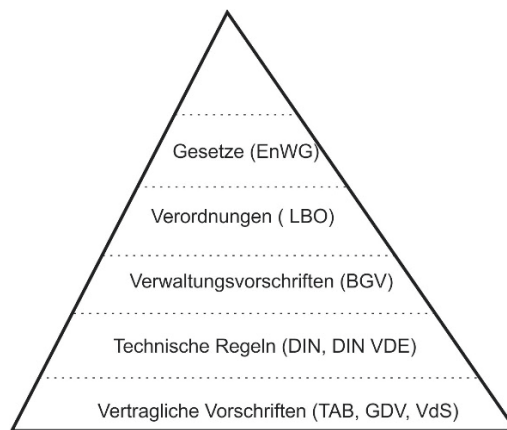


Bild 16.1: Rechtliche Bedeutung von Normen und Vorschriften

16.1 Gesetzliche, behördliche und privatrechtliche Regelungen und Normen

Gesetzliche, behördliche und privatrechtliche Regelungen und Normen sind wichtige Grundlage für die Planung von Elektroanlagen.

1. **Energiewirtschaftsgesetz**

Nach Energiewirtschaftsgesetz (EnWG §16) Teil 6 - Sicherheit und Zuverlässigkeit der Energieversorgung, §49 Anforderungen an Energieanlagen [72]:

- Energieanlagen sind so zu errichten und zu betreiben, dass die technische Sicherheit gewährleistet ist. Dabei sind vorbehaltlich sonstiger Rechtsvorschriften die Allgemein anerkannten Regeln der Technik zu beachten.
- Die Einhaltung der Allgemein anerkannten Regeln der Technik wird vermutet, wenn bei Anlagen zur Erzeugung, Fortleitung und Abgabe von Elektrizität die technischen Regeln des Verbandes der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. eingehalten werden.

2. **Bauordnungen (BO)**

In den Bauordnungen [73] können allgemeine Schutzziele formuliert werden. Konkretere Aussagen enthalten die entsprechenden Ausführungsverordnungen z.B. für:

- Versammlungsstätten VStättVO
- Garagen GaV
- Gaststätten GastVO
- Industriebauten
- Krankenhäuser KhBaoVO

Zudem gibt es Richtlinien für besondere Bereiche in Gebäuden, wie die Musterrichtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen LAR. Die Bauordnungen und ihre Ausführungsvorschriften haben in erster Linie den Schutz von Personen zum Zweck. Dies gilt auch für die so genannte Musterrichtlinie. Die bautechnischen Auflagen sind gleichermaßen Schutzanforderungen und dienen damit auch der Brandschadensverhütung.

3. **Normen und VDE Bestimmungen**

Die VDE-Bestimmungen werden von den Gremien der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Informationstechnik erarbeitet.

Von Bedeutung sind unter Anderem:

DIN VDE 0100 Errichten von Niederspannungsanlagen.

DIN VDE 0100-710 Starkstromanlagen in Krankenhäusern und medizinisch genutzten Räumen außerhalb von Krankenhäusern.

DIN VDE 0100-718 Starkstromanlagen und Sicherheitsstromversorgung in baulichen Anlagen.

DIN VDE 0113 Sicherheit von Maschinen und elektrische Ausrüstung von Maschinen.

DIN VDE 0185-3 Blitzschutzanlagen.

4. **Privatrechtliche Regelungen**

Privatrechtliche Regelungen sind z.B. VdS-Sicherheitsvorschriften Verband der

Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.), VdS-Richtlinien und VdS-Merkblätter. Die Tätigkeiten des VdS teilen sich in verschiedene Bereiche auf z.B.:

- Technische Prüfstellen
- Laboratorien
- Zertifizierungsstelle
- Schulung und Information
- Verlag

5. **Die Betriebssicherheitsverordnung BetrSichV**

Sie ist als Gesetz der BGV A3 (Behörde für Gesundheit und Verbraucherschutz) übergeordnet und regelt die Zuständigkeit der Verantwortung.

6. **BGV A3 Unfallverhütungsvorschrift elektrischer Anlagen und Betriebsmittel**

Die Anwendung und Durchführung der Unfallverhütungsvorschriften wird von den Berufenossenschaften überwacht, bei Nichtbefolgung drohen Sanktionen oder Haftung [74]. Speziell für die Elektrotechnik gilt die UVV BGV A3 elektrische Anlagen und Betriebsmittel. Sie übernimmt Festlegungen aus DIN VDE und wertet sie dadurch rechtlich auf.

Bei der Planung und Projektierung von Niederspannungsanlagen bis 1000 V sind vor allem DIN VDE 0100-Vorschriften zu verwenden, die in einzelnen Teilen hier zusammengestellt sind. Rechtliche Bedeutung von Normen und Vorschriften ist im **Bild 27.5** dargestellt.

- DIN VDE 0100-100:2009-06 Errichten von Niederspannungsanlagen-Teil 1: Allgemeine Grundsätze, Bestimmungen allgemeiner Merkmale, Begriffe-(IEC60364-1:2005, modifiziert); Deutsche Übernahme HD 60364-1:2008
- DIN VDE 0100-200:2006-06 Errichten von Niederspannungsanlagen-Teil 200: Begriffe-(IEC 60050-826:2004, modifiziert)
- DIN VDE 0100-410:2007-06 Errichten von Niederspannungsanlagen-Teil 4-41: Schutzmaßnahmen, Schutz gegen elektrischen Schlag-(IEC 60364-4-41:2005, modifiziert); Deutsche Übernahme HD 60364-4-41:2007
- DIN VDE 0100-420:1991-11 Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V - Schutzmaßnahmen; Schutz gegen thermische Einflüsse
- DIN VDE 0100-430:2010-10 Errichten von Niederspannungsanlagen-Teil 4-43: Schutzmaßnahmen, Schutz bei Überstrom-(IEC 60364-4-43:2008, modifiziert + Corrigendum Okt. 2008); Deutsche Übernahme HD 60364-4-43:2010
- DIN VDE 0100-510:2011-03 Errichten von Niederspannungsanlagen-Teil 5-51: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel, Allgemeine Bestimmungen, (IEC 60364-5-51:2005, modifiziert); Deutsche Übernahme HD 60364-5-51:2009

- VDE 0100-520:2003-06 Errichten von Niederspannungsanlagen-Teil 5: Auswahl und Errichtung von elektrischen Betriebsmitteln, Kapitel 52: Kabel und Leitungsanlagen-(IEC 60364-5-52:1993, modifiziert); deutsche Fassung HD 384.5.52 S1:1995 + A1:1998
- DIN VDE 0100-520 Berichtigung 1:2003-08 Berichtigungen zu DIN VDE 0100-520 (VDE 0100 Teil 520):2003-06
- DIN VDE 0100-520 Beiblatt 1:2008-10 Leitfaden für elektrische Anlagen, Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel, Kabel- und Leitungsanlagen, Begrenzung des Temperaturanstiegs bei Schnittstellenanschlüssen;-Deutsche Fassung CLC/TR 50479:2007
- DIN VDE 0100-520 Beiblatt 2:2010-10 Errichten von Niederspannungsanlagen, Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel, Teil 520: Kabel- und Leitungsanlagen, Beiblatt 2: Schutz bei Überlast, Auswahl von Überstrom-Schutzeinrichtungen, maximal zulässige Kabel- und Leitungslängen zur Einhaltung des zulässigen Spannungsfalls und der Abschaltzeiten zum Schutz gegen elektrischen Schlag (ist in Beiblatt 5 enthalten)
- DIN VDE 0100-530:2011-06 Errichten von Niederspannungsanlagen-Teil 530: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel, Schalt- und Steuergeräte
- DIN VDE 0100-540:2012-06 Errichten von Niederspannungsanlagen-Teil 5-54: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel, Erdungsanlagen, Schutzleiter und Schutzpotentialausgleichsleiter, (IEC 60364-5-54:2002, modifiziert); Deutsche Übernahme HD 60364-5-54:2007
- DIN VDE 0100-560:2011-03 Errichten von Niederspannungsanlagen-Teil 5-56: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel, Einrichtungen für Sicherheitszwecke (IEC 60364-5-56:2009, modifiziert); Deutsche Übernahme HD 60364-5-56:2010
- DIN VDE 0100-600:2008-06 Errichten von Niederspannungsanlagen, Teil 6: Prüfungen, (IEC 60364-6:2006, modifiziert); Deutsche Übernahme HD 60364-6:2007
- DIN EN 60909-0 (VDE 0102): 2002-07 Berechnen von Kurzschlussströmen in Drehstromnetzen
- DIN VDE 0276-1000 (VDE 0267 Teil 100): Juni 1995 Starkstromkabel-Teil 1000: Strombelastbarkeit, Allgemeines, Umrechnungsfaktoren
- DIN VDE 0298-4 (VDE 0298 Teil 4): August 2003 Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen Teil 4: Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabel und Leitungen für feste Verlegung in und an Gebäuden und von flexiblen Leitungen
- DIN EN 60439-2 (VDE 0660-502) Juli 2006 Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen, Teil 2: Besondere Anforderungen an Schienenverteiler (IEC 60439-2:2000 + A1:2005; EN 60439-2:2000 + A1):2005

- DIN EN 60947-2 (VDE 0660-101): April 2007 Niederspannungsschaltgeräte Teil 2 Leistungsschalter (IEC 60947-2:2006; EN 60947-2:2006)
- DIN EN 60898-1 (VDE 0641-11): März 2006 Elektrisches Installationsmaterial, Leitungsschutzschalter für Hausinstallationen und ähnliche Zwecke Teil 1 Leitungsschutzschalter für Wechselstrom (AC) (IEC 60898-1:2002, modifiziert + A1:2002, modifiziert)
- DIN EN 60269-1 (VDE 0636-10): November 2005 Niederspannungssicherungen Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 60269-1:1998; EN 60269-1:1998 + A1:2005)
- DIN EN 60269-2 (VDE 0269-20): September 2002 Niederspannungssicherungen Teil 2: Zusätzliche Anforderungen an Sicherungen zum Gebrauch durch Elektrofachkräfte bzw. elektrotechnisch unterwiesene Personen (Sicherungen überwiegend für den industriellen Gebrauch) (IEC 60269-2:1986 + A1:1995; EN 60269-2:1995 + A1:2002)
- DIN EN 60269-3 (VDE 0269-30): Juli 2004 Niederspannungssicherungen Teil 3: Zusätzliche Anforderungen an Sicherungen zum Gebrauch durch Laien (Sicherungen überwiegend für die Hausinstallationen und ähnliche Anwendungen) (IEC 60269-3:1987 + A1:2003; EN 60269-3:1995 + A1:2003)

16.2 Betriebsmittelvorschriften

Es gelten immer die einschlägigen Gesetze, Vorschriften, Regelungen usw. des jeweiligen Landes. Zu beachten sind ebenfalls in der jeweils aktuell gültigen Fassung:

- die Verordnung über Arbeitsstätten und die Arbeitsstättenrichtlinien (ASR),
- die Vorschriften und Richtlinien, herausgegeben vom VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.,
- die in Spezifikationen als Mindestanforderung angegebenen Gesetze, Vorschriften, Richtlinien und Normen.

16.2.1 Beleuchtung

Generell sind zu beachten:

- Beleuchtungsstärke: Mindestanforderung nach ASR in gültiger Fassung,
- Lampen: Leuchtstofflampen, Lichtfarbe, Elektronisches Vorschaltgerät (EVG)
Lampe/Reflektor: geeignet für Bildschirmarbeitsplätze; blendfrei,

- Steuerung: individuell je Arbeitsplatz und in Gruppen schaltbar über zentrale Schaltstellen an den Zugangstüren / Zugangsbereichen,
- Europäischer Industrie Bus (KNX/EIB), Montagebereiche: lichte Höhe (bis UK Deckenkonstruktion) > 10 m,,
- Leuchtmittel: Hochdruckquecksilberlampe; 1.000 W, lichte Höhe (bis UK Deckenkonstruktion) ≤ 10 m,
- Lichtbänder mit Reflektoren.

Nacht- / Durchgangsbeleuchtung: (gültig für alle o.g. Bereiche), Beleuchtungsstärke, schaltbar an den Zugangstüren / Zugangsbereichen.

Außenbeleuchtung: Leuchtmittel: Natriumhochdruckquecksilberlampe; 1000 W, Schutzklasse IP 54 Steuerung zentral über einstellbaren Dämmerungsschalter.

16.2.2 Elektrische Installationen

Es ist generell bei der Planung elektrischer Installationen zu beachten: Keine losen Verdrahtungen, d.h. Leitungsführung in Kabelrinnen/Kabelkanälen innerhalb definierter Trassen. Alle Leitungen mit separatem Schutzleiter und Kabelrinne. Kabelkanäle sind mit mind. 20% Reserve für weitere Leitungen zu planen. Schaltschränke sind, sofern nicht anders angegeben, mit mind. 20% Reserve für weitere Komponenten zu planen.

16.2.3 Arbeitsplatzinstallationen

Empfehlungen für die Arbeitsplatzinstallationen:

Büro: je Arbeitsplatz, (mind. 15 m² Grundfläche), 2 Stromkreise, separat abgesichert, 1 Stromkreis EDV, 2 Schukosteckdosen rot-orange, 1 Stromkreis Normal, 2 Schukosteckdosen weiß, max. 3 AP bzw. Grundfläche auf einem Stromkreis abgesichert. Datenanschluss in 4-facher Ausführung; CAT 5; RJ45/s. Montagebereiche: je Arbeitsplatz; mind. je ca. 100-150 m² 1 Wandverteiler-Steckdosenkombination bestehend aus jeweils separat abgesichert,

- 1 x 3 Phasen 32 A
 - 1 x 3 Phasen 16 A
 - 4 x 1 Phase 16 A
- Schutzklasse IP 54

Stockwerksverteiler: Ausgerüstet mit mindestens:

- Energiezähler; geeicht, digitale Anzeige

- Überspannungs- und Blitzschutz
- Hauptschalter
- Beschriftungsleiste
- Mindestens 20% Reserve für weitere Komponenten

Gebäudehauptverteiler: Ausgerüstet mit mindestens:

- separater Absicherung der angeschlossenen Stockwerksverteiler
- Komponenten zur Steuerung der Not- und Fluchtwegebeleuchtung (Dauer- und Bereitschaftslicht)
- Kompensationsanlage
- Energiezähler; geeicht
- Mindestens 20% Reserve für weitere Komponenten

Niederspannungshauptverteiler: Ausgerüstet mit mindestens:

- separater Absicherung der angeschlossenen Gebäudehauptverteiler
- Kompensationsanlage
- Energiezähler, geeicht
- Mindestens 20% Reserve für weitere Komponenten

Generell ist auf die Gleichheit der Komponenten im Werk/Bauwerk beachten.

16.3 Starkstromanlagen

Die neu herausgegebene Norm DIN 18015-2:2010-11 gilt für die Art und den Umfang der Mindestausstattung elektrischer Anlagen in Wohngebäuden. Sie ist ebenfalls anzuwenden für Anlagen, die mit Gebäudesystemtechnik, d.h. mit BUS-Technik wie z. B. Konex, ausgerüstet sind. Zu den elektrischen Anlagen in Wohngebäuden gehören:

- Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V,
- Telekommunikationsanlagen, sonstige Fernmelde- und Informationsverarbeitungsanlagen sowie Hauskommunikationsanlagen,
- Empfangs- und Verteilanlagen für Ton- und Fernsehfunk sowie für interaktive Dienste und
- Blitzschutzanlagen.

Die Anzahl der mindestens erforderlichen Stromkreise sind für Steckdosen und Beleuchtung in Abhängigkeit von der Wohnungsgröße, sowie die Anzahl der Steckdosen, Auslässe und Anschlüsse in Abhängigkeit von der Nutzung und den Abmessungen der Räume festgelegt. Dabei sind für alle Anschlüsse mit besonderen Verbrauchsmitteln, wie Waschmaschine, Wäschetrockner, Geschirrspüler, Warmwassergeräte und ähnlichem, separate Stromkreise vorzusehen.

Bild 16.2 zeigt beispielgebend einen Auszug von einem Projekt mit Einbaugeräten.

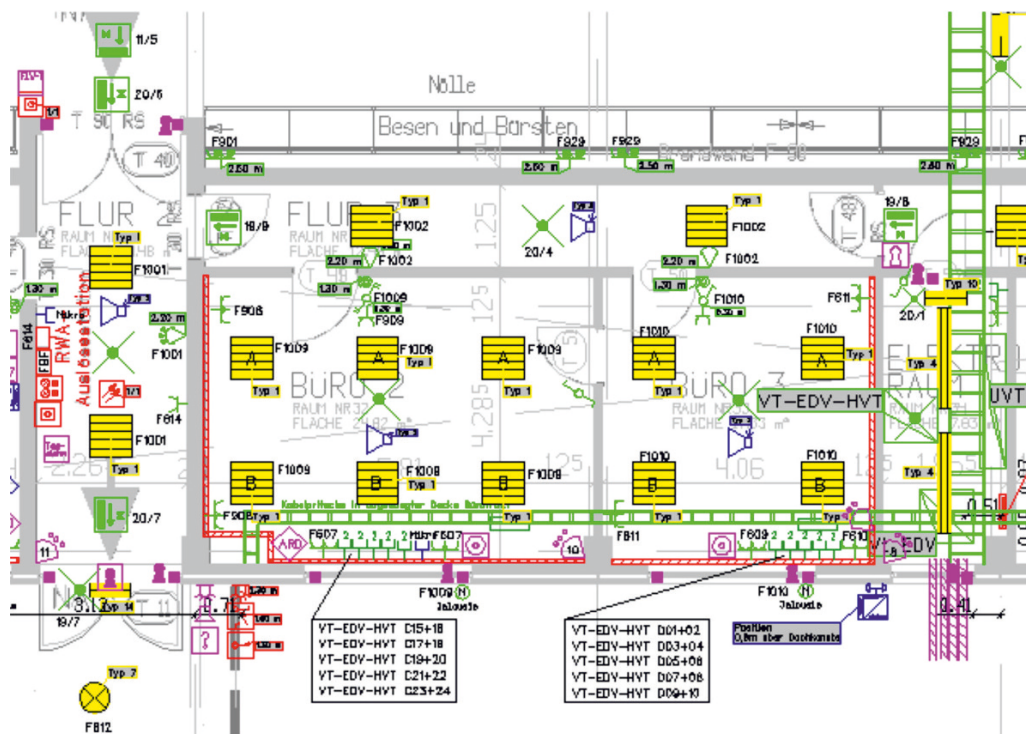


Bild 16.2: Technische Anlagen in Gebäuden

In den Stromkreisverteilern müssen für mögliche Nachrüstungen ausreichend Reserveplätze vorhanden sein. Für Mehrraumwohnungen sind mindestens dreireihige, für solche die mit Gebäudesystemtechnik ausgestattet sind, mindestens vierreihige Verteiler zu montieren. Bei Räumen mit mehr als einer Tür sollte an jeder Tür eine Schaltmöglichkeit für die Beleuchtung installiert werden.

In Schlafräumen ist jedem Raumzugang und an jedem Bett eine solche Schaltmöglichkeit zuzuordnen. Zugangswege, Gebäudeeingangstüren, Treppen und Stufen im Eingangsbereich müssen ausreichend beleuchtet sein.

In allgemein zugänglichen Bereichen von Mehrfamilienhäusern muss die Beleuchtung automatisch oder über, auch bei Dunkelheit erkennbaren, Schaltern und Taster schaltbar sein. Bei Beleuchtungsanlagen mit Abschaltautomatik (Treppenlicht-Zeitschalter) ist zur Vermeidung plötzlicher Dunkelheit eine Warnfunktion, z.B. durch Abdimmen, erforderlich.

Im Freien angeordnete, allgemein zugängliche Anlagen und Steckdosen, sind gegen unbefugte Benutzung oder Manipulation zu sichern, beispielsweise durch zweipoliges Abschalten. Das Blockschema einer Energieverteilung ist im **Bild 16.3** beispielhaft dargestellt.

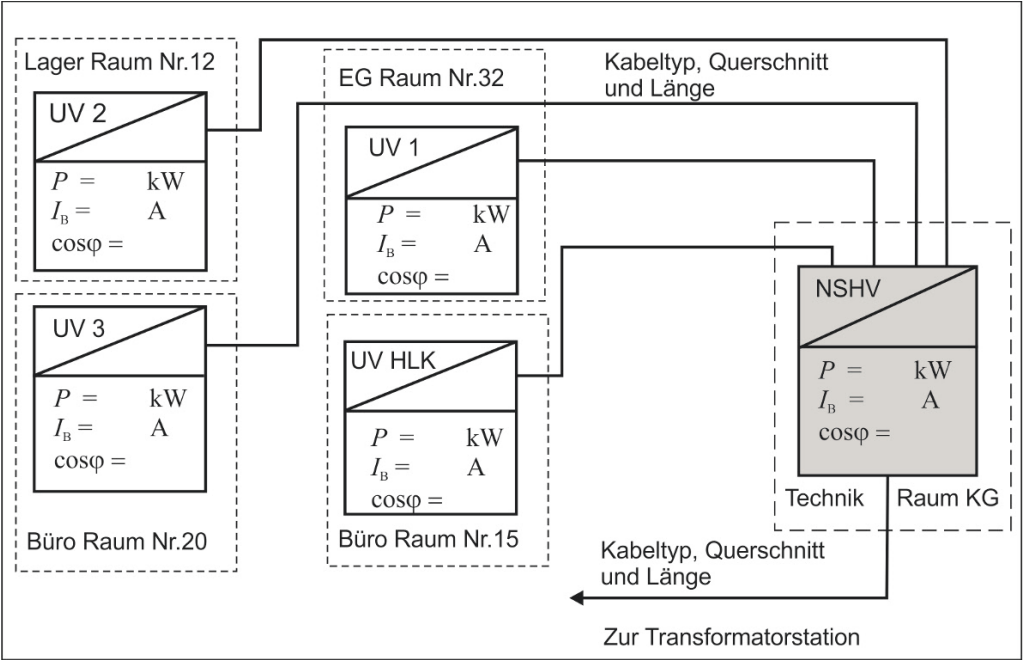


Bild 16.3: Energieverteilung eines Gebäudes in Blockschema

16.4 Empfangs- und Verteilanlage für Ton- und Fernsehrundfunk

In jeder Wohnung ist ein Wohnungsübergabepunkt für die Empfangs- und Verteilanlage festzulegen. Die Anzahl der mindestens erforderlichen Antennensteckdosen orientiert sich an der Wohnungsgröße und liegt zwischen zwei und fünf, wobei Räume mit mehr als 25 m² mit mindestens zwei Antennensteckdosen auszustatten sind. Im **Bild 16.5** ist beispielhaft eine EDV- und Telefonanlage in Gebäuden dargestellt.

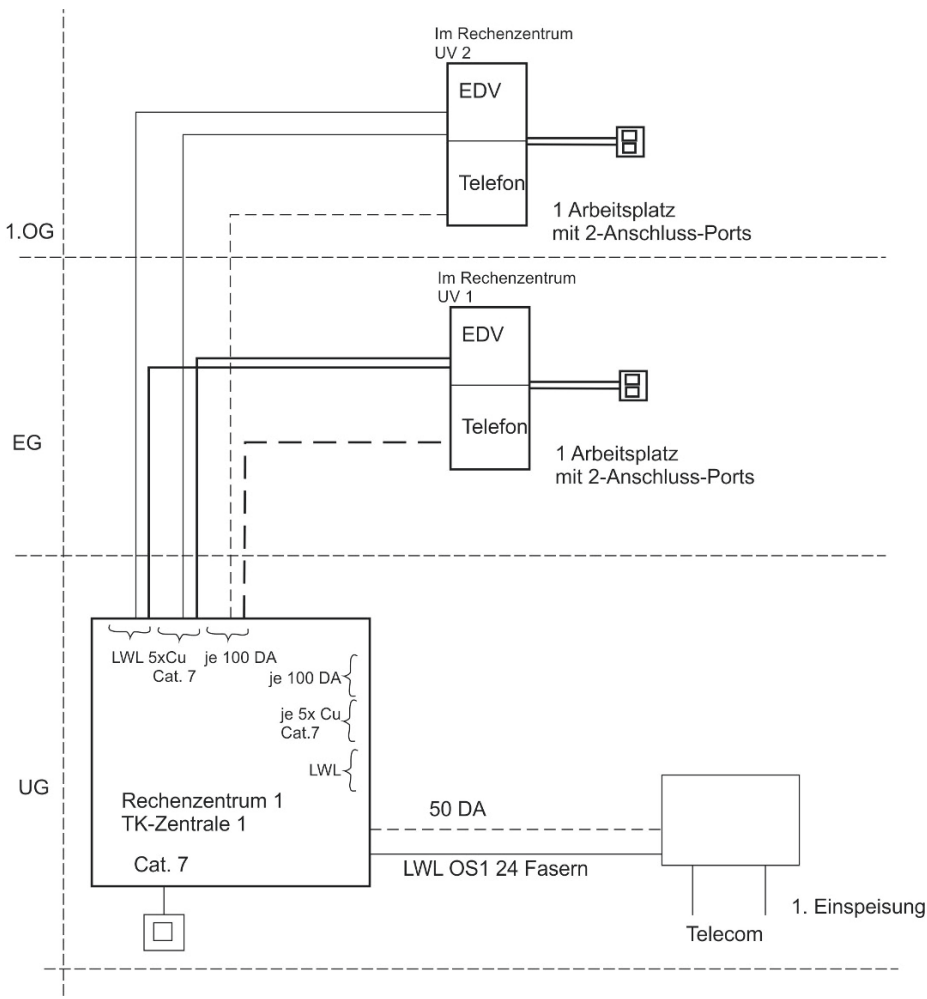


Bild 16.5: EDV- und Telefonanlagen in Gebäuden

Neben jeder Antennensteckdose ist eine Dreifach-Schukosteckdose vorzusehen. Bei der Leitungsführung und der Auswahl der Gerätedosen und Verteilerkästen sind DIN 18015-1 und DIN 18015-3 zu beachten. Beispielsweise sind nach DIN 18015-1, zur Ausschöpfung aller Empfangsmöglichkeiten über terrestrische Antennen, Satellitenantennen und Breitband-Kommunikationsanlagen, mindestens 2 Leerrohre mit je 30 mm Durchmesser zwischen dem obersten und dem untersten Geschoss zu verlegen.

16.5 Kommunikationsanlagen

Für die Hauskommunikation ist jede Wohnung mindestens mit einer Klingelanlage auszustatten. In Gebäuden mit mehr als zwei Wohnungen ist zusätzlich eine Türöffneranlage in Kombination mit einer Türsprechanlage, eventuell mit Bildübertragung, vorzusehen. Weiter ist in jeder Wohnung ein Telekommunikationsabschlusspunkt, in der Regel als 1. TAE, zu installieren. Die Anzahl der weiteren, mindestens erforderlichen TAE-Dosen richtet sich nach der Größe der Wohnung und liegt zwischen eins und vier. Bei der Leitungsführung des notwendigen Leerrohrsystems sowie der Montage der Gerätedosen und Verteiler sind DIN 18015-1 und DIN 18015-3 zu beachten. Die TAE-Dosen sind benachbart zu den Antennensteckdosen anzuordnen. Neben jeder TAE-Dose ist mindestens eine Schukosteckdose vorzusehen. **Bild 16.6** zeigt beispielhaft eine Kommunikationsanlage mit möglichen Kabeldaten.

16.6 Installationsbus (KNX/EIB)

Der Anhang A der Norm DIN 18015 enthält zusätzliche Empfehlungen und Anforderungen zur Ausstattung von Wohnungen mit Gebäudesystemtechnik. Beispielsweise sollten in jedem Raum ein bis zwei Steckdosen für ortsveränderliche Verbrauchsmittel über die Gebäudesystemtechnik schaltbar sein. Weitere zu berücksichtigende Punkte betreffen die Anschlüsse für BUS-fähige Hausgeräte:

- Beleuchtungssteuerung
- Heizungs- und Lüftungsregelung
- Jalousie-, Rollladen- und Markisensteuerung
- Fenster- und Türüberwachung

Nach DIN EN 60616 und 61346 ist für jedes Projekt ein Installationsplan und Symbole im Grundriss und Übersichtsschaltplan ein- oder dreipolig zur Darstellung von Betriebsmitteln zu zeichnen.

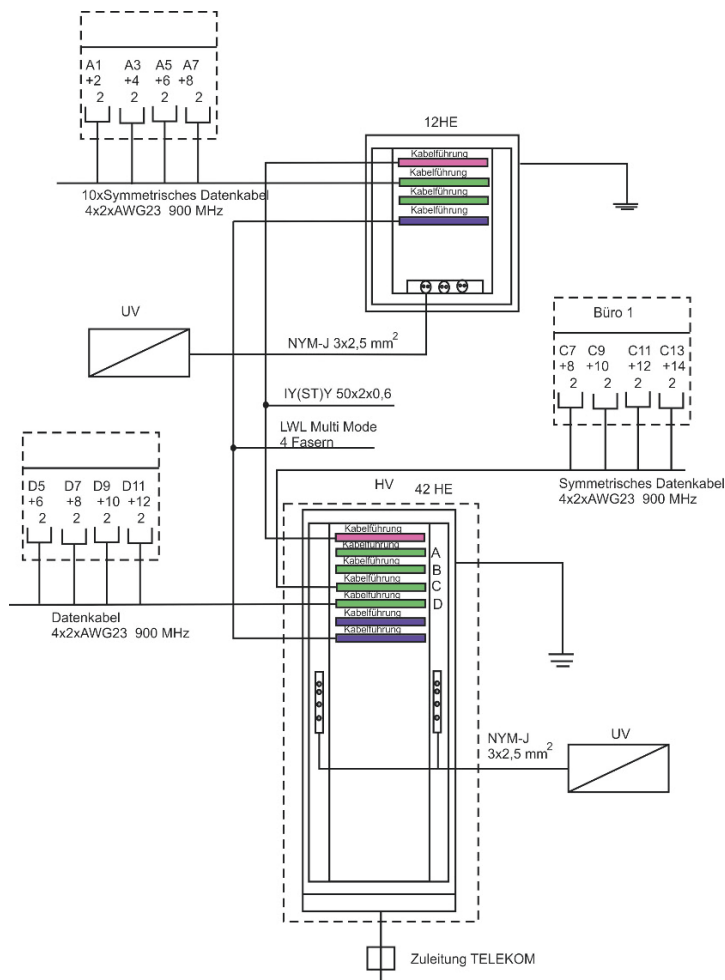


Bild 16.6: Kommunikationsanlagen in Gebäuden

Der Plan enthält die Art der Schutzeinrichtungen und deren Bemessungsstrom, Kabelquerschnitte, Verlegebedingungen, Stromkreisnummer, Schaltungssymbole, Klemmennummer und Zielbezeichnungen.

Nach Beendigung der Installationsarbeiten muss der endgültige korrigierte Plan im Verteiler vorhanden sein. **Bild 16.7** zeigt einen Übersichtsschaltplan eines KNX-Projektes mit Anschlussgeräten.

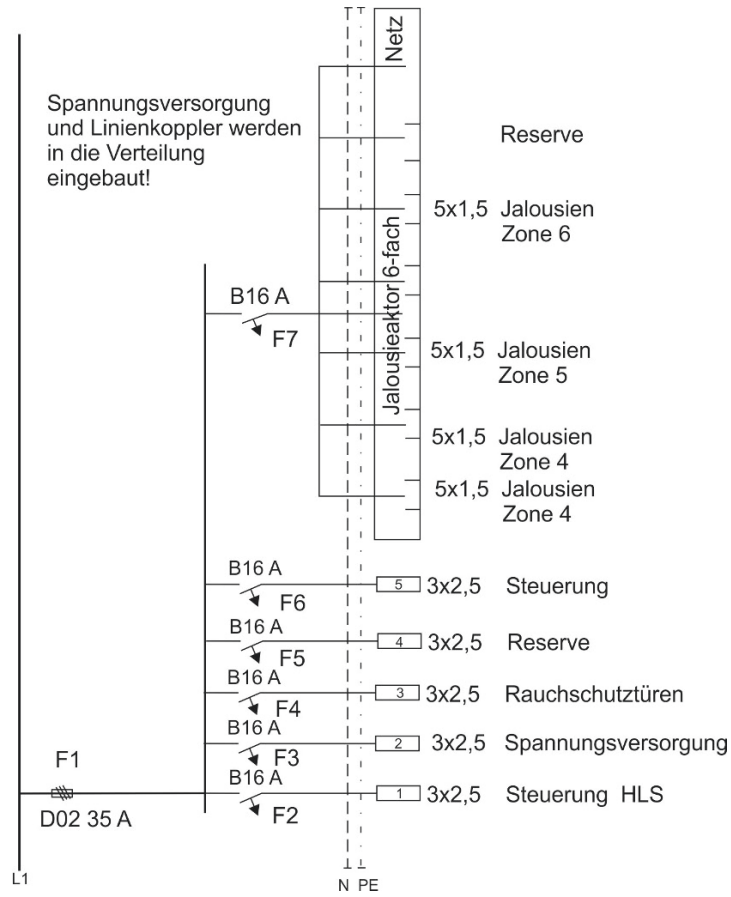


Bild 16.7: Übersichtsschaltplan eines KNX-Projektes in einem Gebäude

16.7 Installationsplan

Auf dem Installationsplan wird die Lage der Betriebsmittel, z.B. der Motoren, Licht- und Steckdosenanschlüsse, Telekommunikationsanlagen, Hauskommunikationsanlagen, Melde- und Informationsverarbeitungsanlagen, angegeben. Die Darstellung erfolgt ohne Angabe der Kabel- und Leitungen, Länge oder Querschnitte. Die Wirkungsweise der Schaltung wird nicht angegeben. Starkstromanlagen, Beleuchtungsanlagen, Kommunikationsanlagen, Erdungs- und Blitzschutzanlagen werden für eine bessere Übersicht getrennt gezeichnet. Außerdem müssen auf dem Installationsplan ein Elektrotrassenplan und Ansichten von Kabelschächten gezeigt werden, um die anderen Gewerke wie Heizungs- und Lüftungsanlagen besser koordinieren zu können (Bild 16.8 und 16.9).

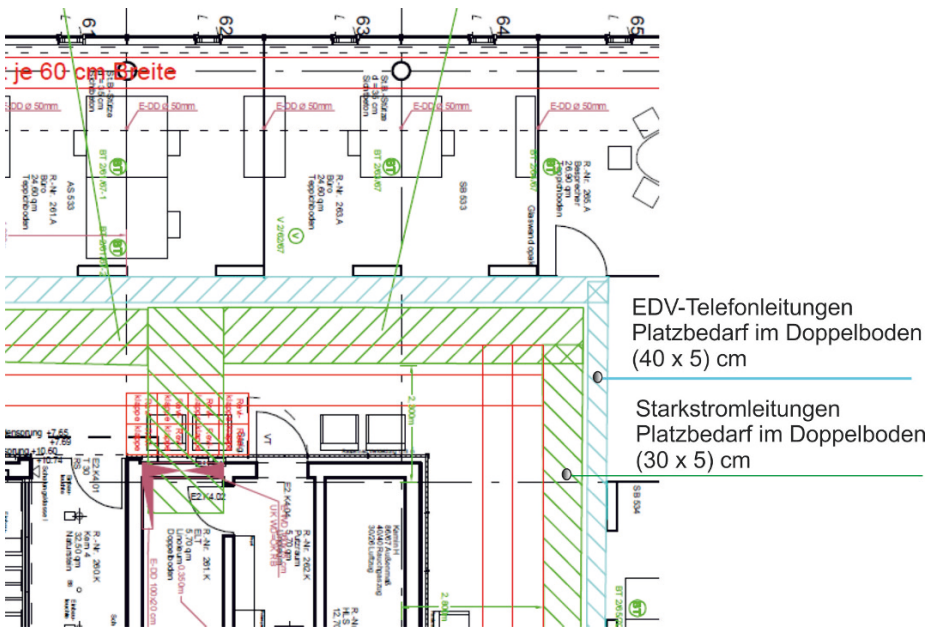


Bild 16.8: Elektrotrassenplan in einer Etage

16.8 Übersichtsschaltplan

Der Übersichtsschaltplan ist die ein- oder dreipolige Darstellung der Stromkreise. Er wird meistens einpolig gezeichnet und gibt nur einen Überblick über die Schutzeinrichtungen, die Stromkreisnummer, die Leistung, Kabeltyp- und Querschnitte und Anschlussorte auf dem Installationsplan. Für die Darstellung der elektrischen Betriebsmittel werden Symbole nach DIN EN 60617 verwenden.

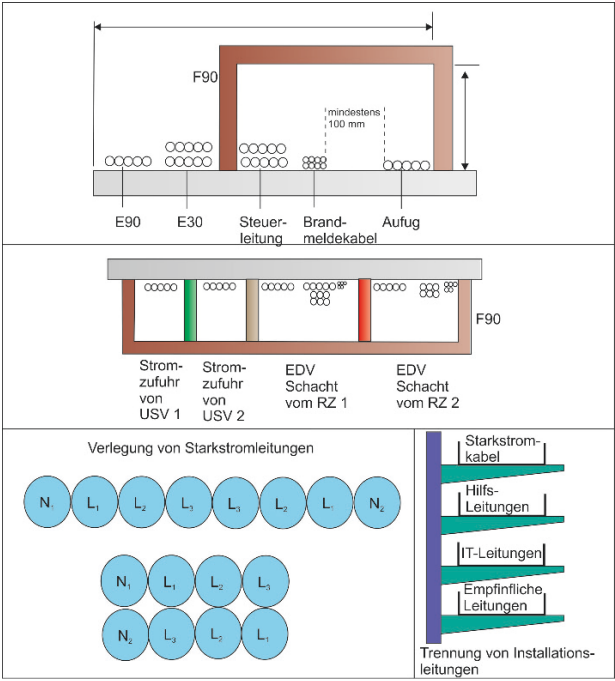


Bild 16.9: Ansichten von Kabelschächten

det (**Bild 16.10**). Bei größeren Verteilungs- und Steuerungsanlagen werden die Stromlaufpläne (Darstellung und die Wirkungsweise der Schaltung) und Anschlusspläne (Kennzeichnung der Klemmen, Anschlüsse von elektrischen Betriebsmitteln) zusätzlich gezeichnet.

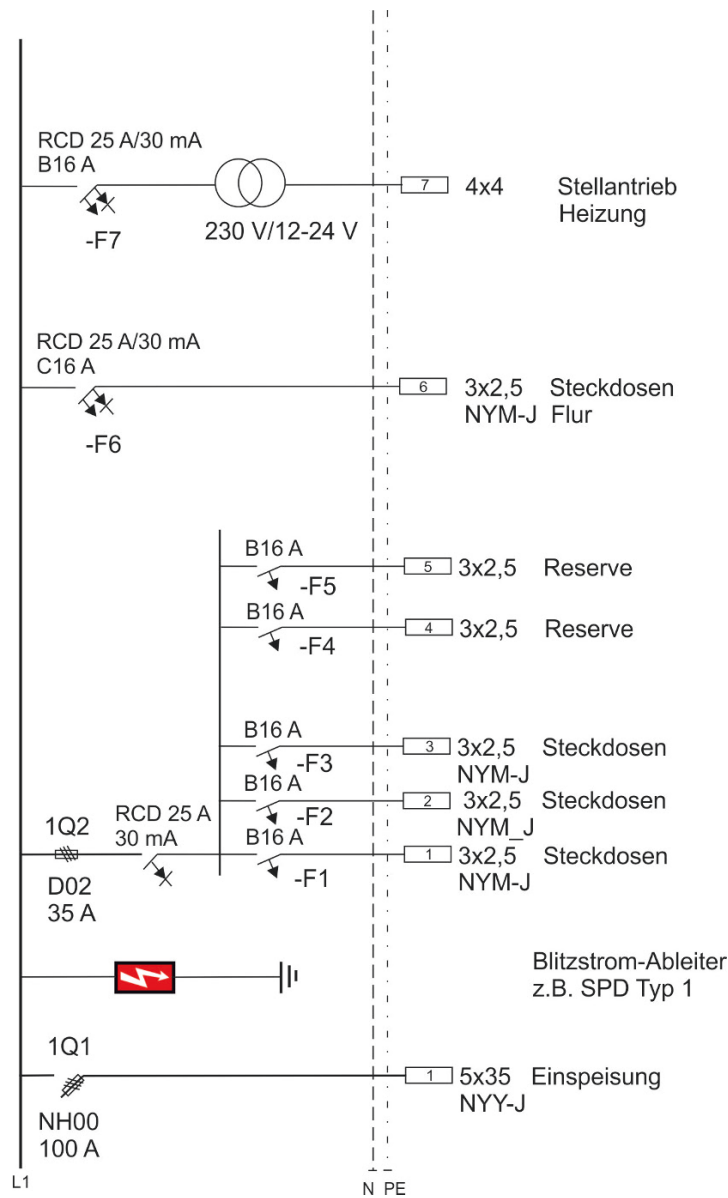


Bild 16.10: Übersichtsschaltplan für ein Büro

16.9 DIN Normen

16.9.1 Haus-Anschlusseinrichtungen nach DIN 18012

Diese Norm gilt für die Planung des Raum- und Flächenbedarfs von Hausanschlusseinrichtungen (Netzanschlusseinrichtungen) der Sparten Strom, Gas, Wasser, Fernwärme und Kommunikation in Wohn- und Nichtwohngebäuden. Sie enthält Festlegungen zu den baulichen und technischen Voraussetzungen für deren Errichtung. DIN 18012 umfasst die räumliche Gestaltung des Hausanschlussraumes, der Hausanschlusswand und der Hausanschlussnische. In **Bild 16.11** sind die Baugrößen dargestellt. Weitere Darstellungen sind in der DIN 18012 angegeben.

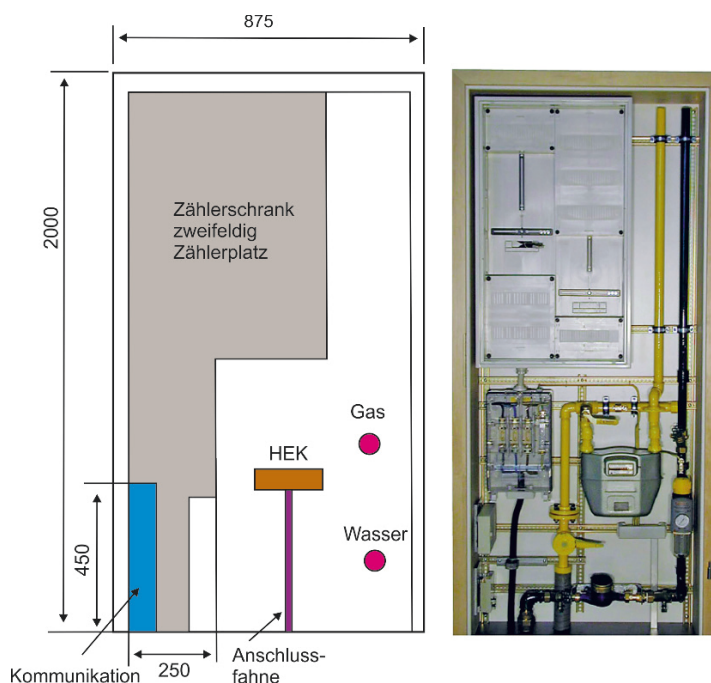


Bild 16.11: Funktionsflächen der Hausanschlussnische

Der Hausanschlussraum, bzw. die Hausanschlusswand muss über allgemein zugängliche Räume oder direkt von außen erreichbar sein, und direkt an der Gebäudeaußenwand liegen, durch die Anschlussleitungen geführt werden. Die Größe des Hausanschlussraumes bzw. die Anordnung der Hausanschlusswand und der Hausanschlussnische sind so zu planen, dass vor der mit 30 cm Tiefe anzunehmenden Zone für die Anschlusseinrichtungen ein Arbeits- und Bedienbereich vorhanden ist. Dieser hat eine Tiefe von mindestens 1,20 m, eine Breite die die Anschluss- und Betriebseinrichtung seitlich mindestens um 30 cm überragt und eine Durch-

gangshöhe von 1,80 m hat. Wände, an denen Anschluss- und Betriebseinrichtungen befestigt werden, müssen den zu erwartenden mechanischen Belastungen entsprechend ausgebildet sein und eine ebene Oberfläche aufweisen. Die Wanddicke muss mindestens 60 mm betragen.

Weitere Anforderungen an den Hausanschlussraum:

1. Der Hausanschlussraum ist mit einer schaltbaren, fest installierten Beleuchtung und mit einer Schutzkontaktsteckdose auszustatten.
2. Der Hausanschlussraum ist mit einer abschließbaren Tür nach DIN 18100 mit einer Breite von 875 mm und einer Höhe von 2.000 mm zu versehen.
3. Jeder Hausanschlussraum ist an seinem Zugang mit der Bezeichnung „Hausanschlussraum“ zu versehen.
4. Die freie Durchgangshöhe unter Leitungen und Kanälen darf im Hausanschlussraum nicht kleiner als 1,80 m sein.
5. Schutzpotenzialausgleich und gegebenenfalls erforderliche Elektroinstallationen sind nach DIN VDE 0100 auszuführen.
6. Bei Fernwärmeanschlüssen ist bei der Auswahl und Errichtung von elektrischen Betriebsmitteln zusätzlich DIN VDE 0100-737 (VDE 0100-737) zu beachten.
7. Ein Hausanschlussraum muss mindestens 2,00 m lang und 2,00 m hoch sein. Die Breite muss min. 1,50 m bei Belegung von einer Wand und min. 1,80 m bei Belegung gegenüberliegender Wände betragen.

16.9.2 Zählerplätze für Elektrizitätszähler

Für die Anordnung der Zählerplätze gelten die technischen Anschlussbedingungen (TAB) des Netzbetreibers. In Mehrfamilien-Häusern sollten die Stromkreisverteiler im Lastschwerpunkt der Wohnungen installiert werden. Innerhalb eines Zäblerschrankgehäuses darf nur der Stromkreisverteiler für eine Wohneinheit (WE) eingebaut werden.

Die Bestückung im unteren und oberen Anschlussraum ist durch den Netzbetreiber vorgeschrieben. Die Norm DIN 18012 gilt für die Nischen, die für den Wandeinbau von Zählerplätzen in der Ausführung mit Zählerplatzumhüllung (Zäblerschränke) nach DIN 43870 Teil 1 und nach E DIN 43870-1/A1 bestimmt sind. **Bild 16.12** zeigt einen Zählerplatz nach der neuesten DIN 18015.



Bild 16.12: Zählerplätze in Gebäuden [46]

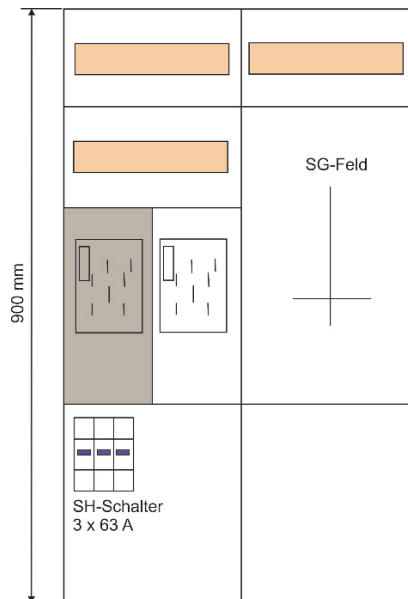


Bild 16.13: Ansicht einer Zählerplatzanlage

16.9.3 Schutzpotentialausgleich

Die folgenden leitfähigen Teile und Erdungsleiter in einem Gebäude müssen über die Haupterdungsschiene zum Schutzpotentialausgleich verbunden werden:

- fremde leitfähige Teile im Gebäude,
- Gebäudekonstruktionen und
- alle Gas- und Wasserrohre, Zentralheizungs- und Klimasysteme.

Mit der Haupterdungsschiene müssen

- Schutzpotentialausgleichsleiter,
- Erdungsleiter, Schutzleiter und
- Funktionsleiter

verbunden werden. Der Querschnitt von Schutzpotentialausgleichsleitern darf nicht weniger als 6 mm^2 Kupfer und nicht größer als 25 mm^2 sein. Bei Blitzschutzanlagen muss der Querschnitt des Potentialausgleichsleiters $> 16 \text{ mm}^2$ sein und dort ein Überspannungsableiter Typ 1 installiert werden. Die **Bilder 16.15, 16.16** und **23.6** zeigen schematische Beispiele für den Schutzpotentialausgleich in der Industrie und in Gebäuden.

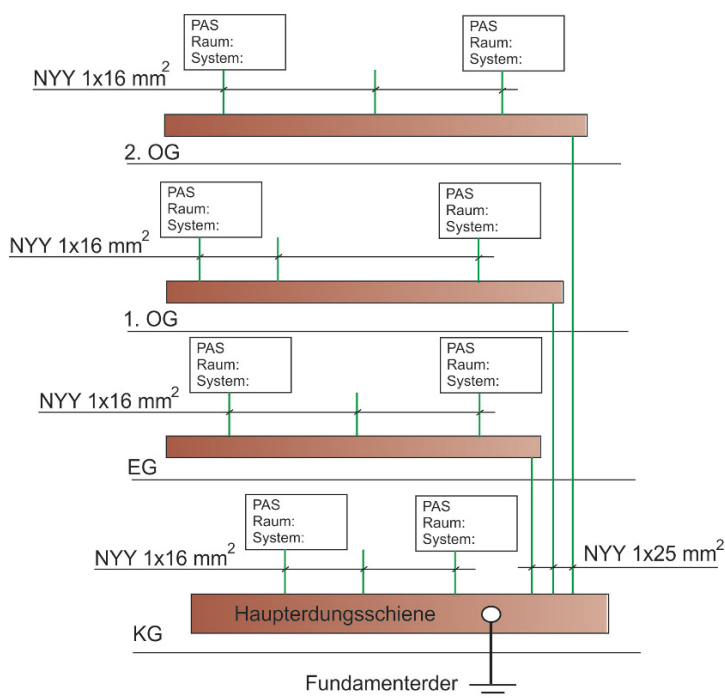


Bild 16.15: Schutzpotentialausgleich einer Mehrfamilienwohnung

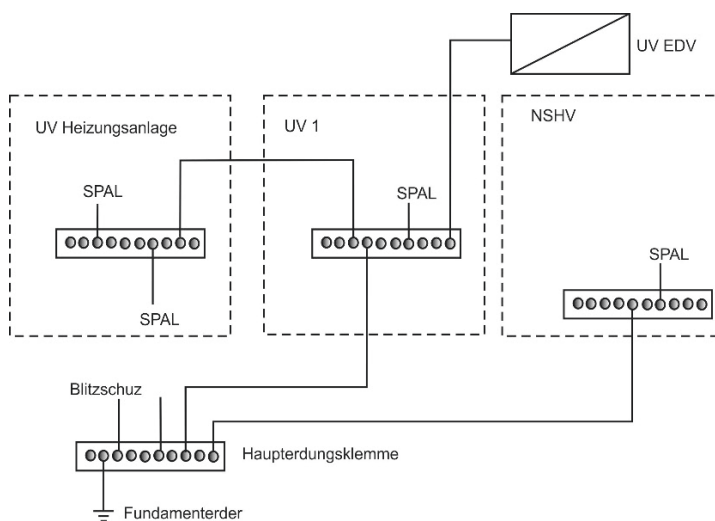


Bild 16.16: Schutzpotentialausgleich in der Industrie (SPAL: Schutzpotentialausgleichsleiter)

16.10 Erdungsanlagen nach DIN VDE 0100-540

Grundsatz der Erdung ist es, die Erde als Referenzpotential (Bezugspotential) zu betrachten, so dass alle mit Erde verbundenen Teile auf diesem Bezugspotential liegen. Es liegen definierte Verhältnisse für die notwendigen Isolationsspannungen aktiver Leiter zur Erde vor. Alle Körper elektrischer Betriebsmittel werden mit diesem Bezugspotential direkt (Schutzleiter) verbunden. Die Standorte um diese Erdverbindungen (Erdungsanlage), von denen aus ein Mensch oder Tier die Körper elektrischer Betriebsmittel berühren kann, nehmen im Falle eines Körperchlusses annähernd das gleiche Potential an. Eine gefährliche Berührungsspannung wird dadurch vermieden. In Netzen bis 1000 V mit TN- und TT-System sowie über 1000 V mit niederohmiger Sternpunktterdung ist im Falle eines Körperchlusses die Auslösung der Überstrom-Schutzeinrichtung sicherzustellen.

Wichtige Begriffe zur Erdung:

Haupterdungsschiene, Haupterdungsklemme (HEK),

Haupterdungs-Anschlusspunkt: Anschlusspunkt oder Schiene, der ein Teil der Erdungsanlage ist und die elektrische Verbindung von mehreren Leitern zu Erdungszwecken ermöglicht. Die HEK muss mit folgenden Leitern verbunden werden:

1. Erdungsleiter,
2. Schutzleiter,
3. Funktionserdungsleiter falls erforderlich und
4. Schutzpotentialausgleichsleiter.

Schutzleiter (Bezeichnung PE):

Leiter zum Zweck der Sicherheit, zum Beispiel zum Schutz gegen elektrischen Schlag [IEV 195-02-09]. Der Querschnitt eines jeden Schutzleiters muss die Bedingungen für die automatische Abschaltung der Stromversorgung erfüllen, die in Abschnitt 411 von DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410):2007-06 gefordert sind und er muss im Stande sein, den zu erwartenden Fehlerstrom zu führen. Der Querschnitt des Schutzleiters muss entweder nach 543.1.2 berechnet oder nach Tabelle 54.2 ausgewählt werden.

Schutzpotentialausgleichsleiter:

Schutzleiter zur Herstellung des Schutzpotentialausgleichs.

Erdungsleiter:

Leiter, der einen Strompfad oder einen Teil des Strompfads zwischen einem gegebenen Punkt in einem Netz, in einer Anlage oder in einem Betriebsmittel und einem Erder herstellt.

Fremdes leitfähiges Teil:

leitfähiges Teil, das nicht zur elektrischen Anlage gehört, das jedoch ein elektrisches Potential einführen kann.

Fundamenterder:

leitfähiges Teil, das unter einem Gebäudefundament in das Erdreich oder bevorzugt im Beton eines Gebäudefundamentes, im Allgemeinen als geschlossener Ring, eingebettet ist. Für neue Gebäude wird die Errichtung eines Fundamenterders nachdrücklich empfohlen. Dort, wo der Erder, um Korrosion zu vermeiden, in Beton eingebettet wird, empfiehlt es sich, den Beton in einer gewissen Qualität auszuführen und einen Abstand von mindestens 5 cm zwischen dem Erder und der Betonoberfläche einzuhalten.

Erder:

leitfähiges Teil, das in ein bestimmtes leitfähiges Medium, zum Beispiel Beton, eingebettet sein kann und in elektrischem Kontakt mit Erde steht. Werkstoffe und Abmessungen der Erder müssen so ausgewählt werden, dass sie Korrosion widerstehen und eine angemessene mechanische Festigkeit besitzen. Für Erder im Erdreich, sind die gebräuchlichen Werkstoffe und die minimalen Abmessungen unter Berücksichtigung von Korrosion und mechanischer Festigkeit in Tabellen enthalten.

Wirksamkeit eines Erders:

ist abhängig von den örtlichen Bodenverhältnissen. Es müssen ein oder mehrere Erder entsprechend den Bodenverhältnissen und dem geforderten Wert des Erdungswiderstandes ausgewählt werden. Als Erder dürfen verwendet werden:

1. Stäbe oder Rohre,
2. Bänder oder Drähte,
3. Platten,
4. unterirdische Konstruktionsteile aus Metall, die im Fundament eingebettet sind,
5. Bewehrung von in Erdreich eingebettetem Beton (ausgenommen Spannbeton).

In Deutschland sind Wasser- und Gasrohre als Erder nicht erlaubt. In allen neuen Gebäuden müssen Fundamenterder nach der Norm DIN 18014 vorhanden sein.

16.10.1 Auswahl und Errichtung von Erdungsanlagen

Für die Schutzmaßnahmen bei indirektem Berühren in TN-, TT- und IT-Systemen sind Erdungsanlagen erforderlich. Entsprechend ihrem Zweck müssen bestimmte Grenzen des Ausbreitungswiderstandes über längere Zeit eingehalten werden. Der Ring- oder Fundamenterder wird für die Blitzschutzanlagen mitbenutzt. Metallene Rohrsysteme, wie z. B. Wasserleitungen, dürfen die Funktion des Erders nicht übernehmen, beziehungsweise die Erdungsanlage muss auch ohne angeschlossenen Rohrsystem seine Funktion behalten.

16.10.2 Erdungsarten

Es gibt folgende Erdungsarten:

1. Oberflächenerder: Zu unterscheiden sind folgende Bauarten:

- Ringerder: Der Ringerder wird oft als Blitzschutzerder verwendet. Er umschließt in der Regel in etwa einem Meter Abstand das zu schützende Gebäude, wenn z. B. im Altbau ein Fundamenterder fehlt. Der Ringerder eignet sich besonders zur Potentialsteuerung, d.h. zur Verringerung der Schrittspannung an der Erdoberfläche.
- Banderder: Er ist bei der Kabelverlegung gebräuchlich, da der Kabelgraben den Erder mit aufnehmen kann.
- Strahlenerder: Es werden bis zu 6 Banderder strahlenförmig um einen Punkt verlegt. Man bekommt auf diese Weise auf der Erdoberfläche mit geringer Ausdehnung einen verhältnismäßig kleinen Ausbreitungswiderstand. Werden die äußeren Strahlen noch durch einen Ring verbunden, erhält man den so genannten Maschenerder.

2. Tiefenerder: Geeignet für Erdungen aller Art in allen Bodenarten, außer Fels. Der Widerstand ist abhängig von der Bodenart, deren Feuchtigkeit und Temperatur. Für Tiefenerder werden zusammensetzbare Erdstäbe in Längen von jeweils 1,5 m oder 2 m verwendet. Sie können sowohl senkrecht als auch schräg in den Boden eingetrieben werden. Die Gesamtlänge einer Tiefenerdung hängt von dem geforderten Erdungswiderstand ab. Ein Erdungssystem besteht aus einer Tiefenerderspitze, mehrere miteinander durch eine Kugelpressverbindung zusammengefügtten Erdungsstäben und einem Anschlussrundstück oder einer Anschlussschelle. Bohrung und Zapfen bilden eine Presspassung. Bei diesem Verbindungssystem wirkt die Flächenpressung auf die gesamte Umfangsfläche des Zapfens.

16.10.3 Fundamenterder nach DIN 18014

Ein Fundamenterder kann die Wirksamkeit des Schutzpotentialausgleichs verbessern. Er ist darüber hinaus geeignet zum Zweck der Schutzerdung und der Funktionserdung (z.B. für Blitzschutzsysteme), wenn die in den jeweiligen DIN-VDE-Normen, z.B. DIN VDE 0100-540 (VDE 0100 Teil 540), enthaltenen Voraussetzungen erfüllt werden. Alle metallisch leitenden Systeme in einem Haus können elektrische Spannungen verschleppen, und das führt zu gefährlichen Berührungsspannungen. Um dies zu vermeiden, wird in das Fundament der Außenwände ein Fundamenterder eingelegt, an dem alle metallisch leitenden Systeme angeschlossen werden. Dadurch wird ein Potentialausgleich erzielt. Als Material wird Band-

stahl verwendet, der einen geschlossenen Ring im Fundament bilden muss. Für jeden Neubau ist ein Fundamenterder Pflicht (**Bild 16.17**). Neben der Sanitär- und Elektroinstallation wird auch die Antennen-, Blitzschutz- und Fernmeldeanlage angeschlossen. In etwa 30 cm Höhe soll die Anschlussfahne im Hausanschlussraum herausgeführt werden und eine Länge von ca. 1,5 m haben. Oberhalb der Anschlussfahne ist die Potentialausgleichschiene anzubringen (**Bild 16.17** und **16.18**).

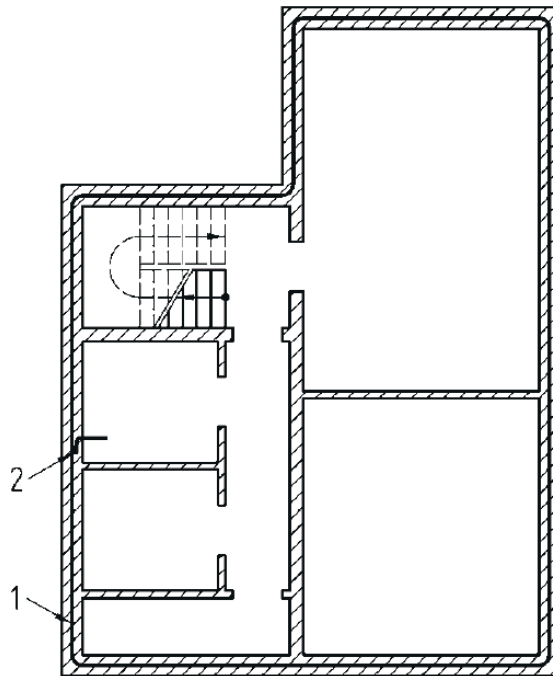


Bild 16.17: Anordnung des Fundamenterders, 1 Fundamenterder 2 Anschlusssteil

16.11 Leitfaden für die Gebäudeplanung

Planungsschwerpunkte und Bau von Elektroanlagen in Gebäuden:

1. Fundamenterder:

Erstellen Sie einen Fundamenterderplan, aus dem die erforderlichen Maschen ersichtlich sind. Zeichnen Sie hierbei ebenfalls die entsprechenden Erdungsanschlüsse für z.B. den Elektroverteilterraum und weitere Trennstellen, wie z.B.

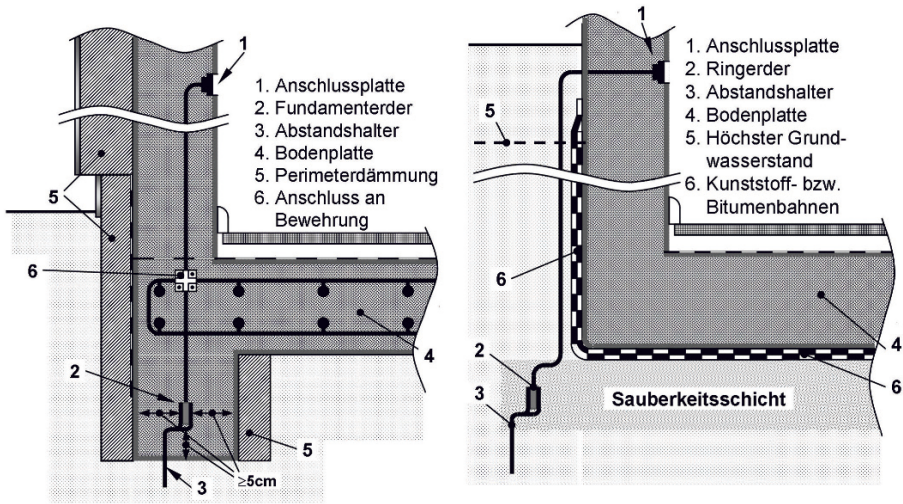


Bild 16.18: Verlegungsformen des Fundamenterders [39]

für Glasfassaden ein.

2. Einlegearbeiten:

Machen Sie sich durch Vorüberlegungen bewusst, wo Betoneinlegearbeiten zu erstellen sind. Hierbei sind z.B. Leerrohre für die Gebäudeeinführung, die Verbindung von Brandabschnitten, oder für die Installation in Sichtbeton zu berücksichtigen.

3. Für die Installation in Sichtbeton sind allerdings zunächst die Installationspläne zu erstellen.

4. Trassenführung:

Zeichnen Sie in einen Plan die Haupttrassen (z.B. Verbindung der verschiedenen Unterverteiler) ein und dimensionieren Sie diese überschlägig. Stimmen Sie sich hierbei mit den anderen Gewerken ab. Hierzu sollten Sie sich bewusst machen, wie viele Stromkreise ungefähr pro Verteilung zu erwarten sind. Unterscheiden Sie bei diesen Trassen:

- Elektroversorgung
- Kommunikationstechnik (EDV, Telefon und MSR)
- Funktionserhalt (für Notbeleuchtung usw. falls benötigt)

5. Raumbuch:

Erstellen Sie ein Raumbuch für repräsentative Räume bezüglich:

- Elektroausstattung (konventionell, Bus, Bewegungsmelder usw.)
- Beleuchtung (konventionell gedimmt)
- Medientechnik (Beamer, Lautsprecher usw.)

Stellen Sie hierbei evtl. einen Bezug zu den Raumtypen der MSR- Technik her, da es hier zu funktionellen Zusammenhängen kommen kann.

6. Kabel und Leitungen:

Dimensionieren Sie für folgende Fälle mit Berücksichtigung der Verlegeart den Kabelquerschnitt, und geben Sie den zu verwendenden Kabeltyp an.

- Zuleitung zu einer Unterverteilung (mit Überschlagung der Anschlussleistung),
- Zuleitung zu der entferntesten Steckdose,
- Zuleitung zu einem beispielhaften Beleuchtungsstromkreis.

7. Elektroinstallationspläne:

Beginnen Sie anhand des erstellten Raumbuches mit der Erstellung der Elektroinstallationspläne. Setzen Sie u.a. folgende Komponenten in den Plänen ab:

- Schalter, Taster usw.
- Leuchteneinteilung (fertigen Sie in diesem Zusammenhang für 3 Referenzräume eine Lichtsimulation an)
- Falls durch das Raumbuch eine EIB- Installation für bestimmte Räume gefordert wird sollten folgende Punkte abgearbeitet werden:
 - Absetzen der EIB- Taster bzw. Tasterschnittstellen für Beleuchtung und Jalousien.
 - Abzählen der benötigten Aktoren (Schalt- Dimmaktoren Leuchten, ggf. Dali-Gateways, Schaltaktoren usw.)
 - Anfertigen eines EIB- Schemas mit Spannungsversorgungen, Linienkoppler, Wetterstation usw.
 - Einteilung von Präsenz- bzw. Bewegungsmeldern.

8. Verteileranlagen:

- Wählen Sie die geeigneten Leitungsschutzschalter bzw. Sicherungen für die berechneten Kabelquerschnitte aus. Entscheiden Sie ebenfalls welche weiteren Verteilereinbaugeräte in den Verteiler zu installieren sind. (z.B. Busgeräte, Hauptschalter usw.) und schätzen Sie die erforderlichen Teilungseinheiten ab.
- Erstellen Sie eine Verteileraufbauzeichnung für eine Unterverteilung und wählen Sie hierbei den passenden Schrank aus. Tragen Sie die Verteilerstandorte in die Pläne ein. Beachten Sie hierbei Ihre bereits geplanten Kabelwege bzw. Trassenplanung.

9. EDV-Netz:

Erstellen Sie ein Schema, aus dem der prinzipielle Aufbau des benötigten EDV-Netzwerkes hervorgeht, und tragen Sie die Verteilerstandorte in die Pläne ein.

Beachten Sie hierbei Ihre bereits geplanten Kabelwege bzw. die Trassenplanung.

10. Brandmeldetechnik:

Planen Sie, je nach Anforderung die Positionen der Rauch bzw. Wärmemelder, und stimmen Sie diese mit den Deckenspiegeln (Leuchten, Präsenzmelder, Beamer usw.) ab. Beachten Sie auch die Übergänge in die verschiedenen Brandabschnitte und sehen Sie hier Entsprechende Rauchschutztüren vor.

11. RWA-Anlage:

Stellen Sie die erforderlichen Rauch- und Wärmeabzugsanlagen zusammen und sehen Sie hierfür einen geeigneten Platz in den Plänen vor.

12. Blitzschutzanlage:

Zeichnen Sie in den Dachaufsichtsplan die Fangstangen und Maschen der Blitzschutzanlage ein. Ermitteln Sie zuvor die entsprechenden Abstände durch ein geeignetes Verfahren (z.B. Maschenverfahren oder Kugelverfahren).

17 Schutzkonzepte

Die Anerkannten Regeln der Technik sind per Gesetz zwingend zu beachten. Die VDE-Bestimmungen gestatten es, von bestimmten Anforderungen abzuweichen, wenn mindestens die gleiche Sicherheit gewahrt bleibt. Andererseits stellt DIN VDE 0022 an gleicher Stelle folgende Forderung: In Ausnahmefällen können weitergehende Maßnahmen geboten sein. In diesem Kapitel werden

1. die Wirkungen des Stromes,
2. die Schutzmaßnahmen und
3. die Bedeutung des Hauptpotentialausgleichs

beschrieben [1], [11], [31], [32].

17.1 Begriffe und Benennungen

Die wichtigsten Begriffe in diesem Abschnitt sind:

- Abschaltstrom:
Strom, der das automatische Abschalten der ÜSE innerhalb der vereinbarten Zeit bewirkt.
- Schleifenimpedanz:
Impedanz der Fehlerschleife, die aus der Stromquelle, dem aktiven Leiter bis zum Fehlerort und dem Schutzleiter zwischen dem Fehlerort und der Stromquelle besteht.
- Schutz durch Abschaltung:
Schutzmaßnahme, die für den Schutz bei indirektem Berühren vorgesehen ist. Die Stromversorgung des Stromkreises muss bei einem Fehler automatisch abgeschaltet werden.

- Basisschutz (Schutz gegen direktes Berühren):
Maßnahmen zum Schutz vor Gefahren einer Berührung mit aktiven Teilen im normalen, ungestörten Betrieb. Es kann sich um vollständigen oder teilweisen Schutz handeln. Bei teilweisem Schutz besteht nur Schutz gegen zufälliges Berühren
- Fehlerschutz (Schutz bei indirektem Berühren):
Schutz vor Gefahren, die sich im Fehlerfall aus einer Berührung mit Körpern oder fremden leitfähigen Teilen ergeben können.
- Schutz durch Abschaltung oder Meldung:
Diese Schutzmaßnahme erfordert eine Koordinierung der Netzform und der Schutzeinrichtungen. Die Körper müssen unter den für jede Netzform festgelegten Bedingungen an Schutzleiter angeschlossen werden. Der Schutzleiter (PE) und der PEN-Leiter sind nach VDE 0100 Teil 540 zu bemessen.
- Berührungsspannung:
Die Grenze für die dauernd zulässige Berührungsspannung beträgt bei Wechselspannung 50 V, bei Gleichspannung 120 V.

Schutzmaßnahmen sind grundsätzlich erforderlich. Insbesondere ist Folgendes zu beachten:

1. Gefährliche Körperströme
2. Übertemperaturen
3. Überspannungen
4. Bewegte Teile in Anlagen.

17.2 Physikalische Einwirkungen

Die Wärmeentwicklung beim Stromdurchgang führt zu inneren und äußeren Verbrennungen aller Schweregrade in Abhängigkeit von der Stromstärke und Einwirkdauer. Große Stromstärken bewirken das Auskochen der Gewebeflüssigkeit und Zerstörung des Eiweißes mit häufig tödlicher Wirkung nach einigen Tagen, da der Körper die giftigen Verbrennungsprodukte nicht abbauen kann. An den Berührungsstellen finden sich oft kleine punktartige Verbrennungen und Stromdurchschläge.

17.3 Physiologische Einwirkungen

Der elektrische Strom bewirkt ab einer relativ niedrigen Reizschwelle Muskelverkrampfung, oft mit der Folge, dass der berührte Gegenstand vom Verunglückten nicht mehr losgelassen werden kann. Dies erschwert die Bergung und erhöht die Stromeinwirkungszeit auf Verunglückte. Bei steigender Stromstärke wird das Reizleitungssystem des Herzens beeinflusst. Es entsteht eine unregelmäßige Herzmuskeltätigkeit bis hin zur Herzmuskelverkrampfung und bis zum Herzstillstand. Bei der Einwirkung von elektrischen Wechselstrom bis 5 mA entstehen nur geringe Einwirkungen; bis 15 mA beginnt das Verkrampfen, Loslassen des Kontaktes ist noch möglich; bei 25-50 mA beginnen Herzunregelmäßigkeiten; über 50 mA tritt Bewusstlosigkeit ein und ab 80 mA setzt Herzkammerflimmern mit tödlicher Wirkung ein.

17.4 Wirkungen des elektrischen Stromes

Der elektrische Strom kann bei Menschen zu tödlichen Unfällen führen. Die Wirkung des Stromes auf den Menschen hängt ab von der Stromstärke, der Stromart, vom Weg des Stromes im Körper, der Einwirkdauer und der Frequenz. Wenn ein Strom von außen den Körperströmen überlagert wird, kommt es zu Fehlfunktionen der angesteuerten Körperorgane, z. B. zur Verkrampfung der Muskeln oder zum lebensgefährlichen Herzkammerflimmern. Die Verkrampfung der Handmuskulatur führt dazu, dass man den stromführenden Gegenstand nicht mehr loslassen kann. Das Herzkammerflimmern bedeutet Ausfall der Herzfunktion und damit Ausfall des Blutkreislaufs. Das Gehirn als empfindlichstes Organ wird ohne Blutversorgung innerhalb kürzester Zeit dauerhaft geschädigt. Schon nach wenigen Minuten tritt der Tod ein. Zum Schutz vor Unfällen mit Elektrizität müssen deshalb alle stromführenden Teile wie Kabel, Geräte oder Installationen durchgängig isoliert sein. Es ist Sache des Benutzers, darauf zu achten, dass keine Teile mit beschädigter Isolierung benutzt werden. Für den Schutz bei indirektem Berühren sind folgende Schutzmaßnahmen in Niederspannungsnetzen sehr wichtig:

- Schutz durch Abschaltung
- Koordination der Schutzeinrichtungen (ÜSE) miteinander
- Zuordnung der ÜSE mit Kabeln und Leitungen
- Bemessung der Erdungsanlagen
- Auswahl der Schutz- und Potentialausgleichsleitungen
- Ausführung des Potentialausgleichs

17.5 Schutzkonzept

Das **drei-Stufen-Schutzkonzept** nach EN 61140 (VDE 0100-410): Schutz gegen elektrischen Schlag in Anlagen kann folgendermaßen erreicht werden:

1. Basisschutz:

Der Basisschutz verhindert direktes Berühren gefährlicher Spannungen bei fehlerfreier Anlage (**Bild 24.20**). Er wird durch die Schutzart z. B. IP 20 beschrieben.

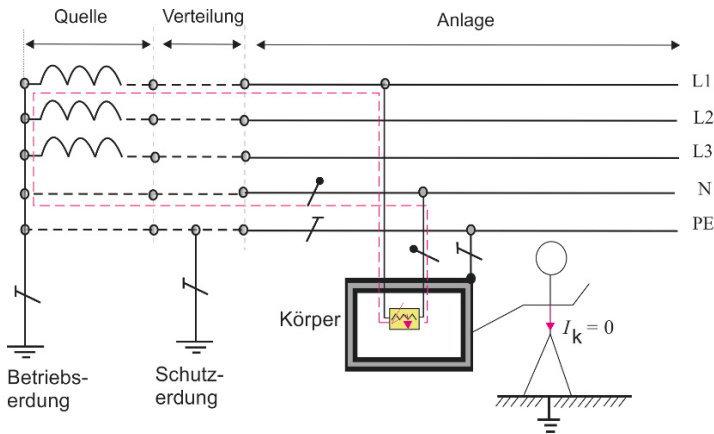


Bild 17.1: Schutz gegen direktes Berühren

2. Fehlerschutz:

Der Fehlerschutz verhindert direktes Berühren gefährlicher Spannungen beim ersten Fehler in der Anlage bei Versagen des Basisschutzes (**Bild 17.2**). Er wird durch die Schutzklasse (SK) z. B. SK I mit Schutzleiter (PE) beschrieben.

3. Zusatzschutz:

Der Zusatzschutz verhindert gefährliche Körperdurchströmung beim Versagen der Schutzvorkehrung des Basisschutzes und/oder des Fehlerschutzes (**Bild 17.3**). Er wird durch die Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) beschrieben.

17.6 Art der Erdverbindung, Schutz durch automatische Abschaltung

Die Grundregel des Schutzes gegen elektrischen Schlag nach DIN EN 61140 (VDE 0140-1) ist, dass gefährliche aktive Teile nicht berührbar sein dürfen und berührbare leitfähige Teile weder unter normalen Bedingungen noch unter Einzelfehler-

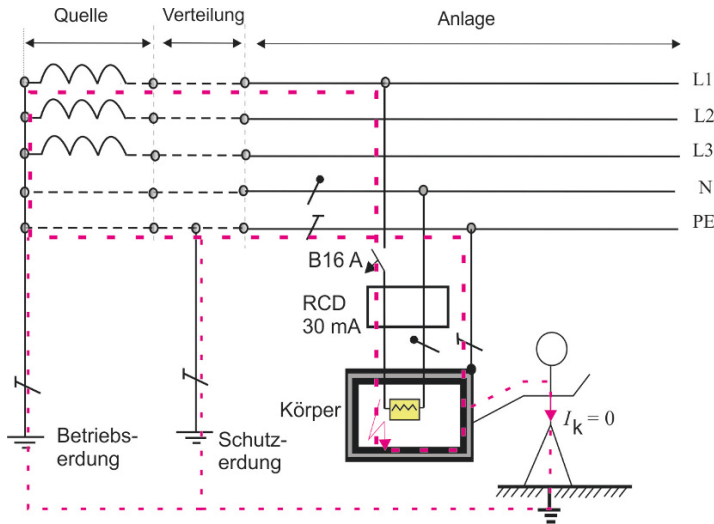


Bild 17.2: Schutz bei indirektem Berühren

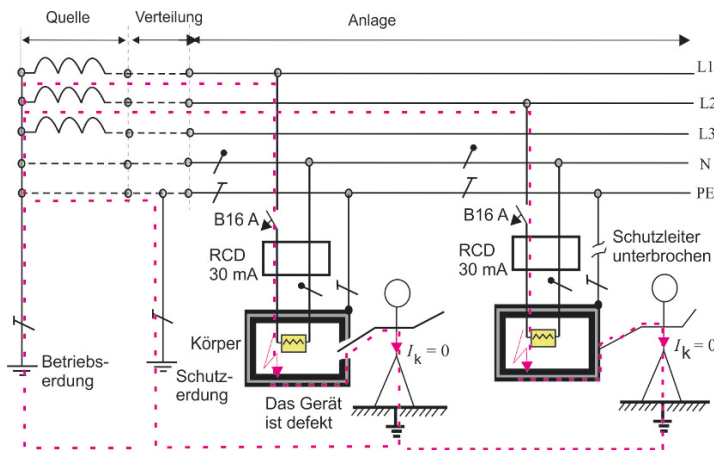


Bild 17.3: Zusatzschutz mit RCD

bedingungen zu gefährlichen aktiven Teilen werden dürfen. DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410) enthält wesentliche Anforderungen für den Schutz gegen elektrischen Schlag einschließlich Basisschutz (Schutz gegen direktes Berühren) und Fehlerschutz (Schutz bei indirektem Berühren) von Personen und Nutztieren. Bei der Betrachtung von Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag sind zwei wesentliche Ursachen für eine Gefährdung des Menschen zu berücksichtigen:

- Berühren von betriebsmäßig unter Spannung stehenden Teilen
- Berühren von leitfähigen Teilen (Körper eines Gerätes), die nur im Fehlerfall unter Spannung stehen

17.6.1 TN-Systeme

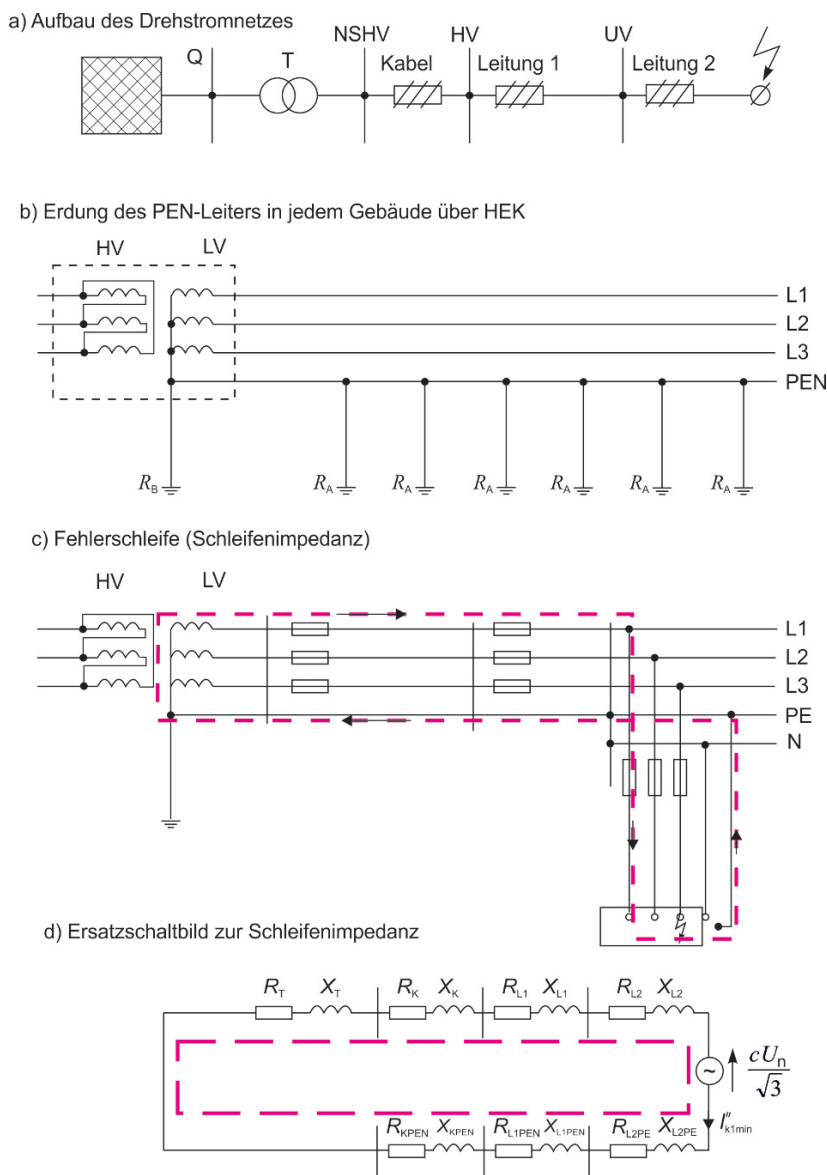


Bild 17.4: Netzaufbau und Ersatzschaltung des TN-Systems

In TN-Systemen hängt die Erdung der elektrischen Anlage von der zuverlässigen und wirksamen Verbindung des PEN-Leiters oder Schutzleiters mit Erde ab (**Bild 17.4**). Wo die Erdung durch ein öffentliches oder anderes Versorgungssystem vorgesehen wird, sind die notwendigen Bedingungen außerhalb der

elektrischen Anlage in der Verantwortlichkeit des Verteilungsnetzbetreibers. Der Neutral- oder der Mittelpunkt des Versorgungssystems muss geerdet werden. Wenn ein Neutral- oder Mittelpunkt nicht verfügbar oder nicht zugänglich ist, muss ein Außenleiter geerdet werden. Körper der Anlage müssen durch einen Schutzleiter mit der Haupterdungsschiene der Anlage verbunden sein, die mit dem geerdeten Punkt des Stromversorgungssystems verbunden ist. Für das TN-System erhält man folgende Abschaltbedingungen für die Schleifenimpedanz:

$$Z_s \leq \frac{U_0}{I_a} \quad (17.1)$$

Die Schleifenimpedanz besteht aus:

- der Stromquelle,
- dem Außenleiter bis zum Fehlerort und
- dem Schutzleiter zwischen dem Fehlerort und der Stromquelle.

Es bedeuten:

Z_s : Schleifenimpedanz, U_0 : Leiter-Erde-Spannung, I_a : Abschaltstrom der ÜSE

17.6.2 TT-Systeme

Der Fehlerstrom bei TT-Systemen wird zum Erdschlussstrom und fließt über Erder (Erde) zur Stromquelle (**Bild 17.5**). Der auftretende Fehlerstrom soll das defekte Betriebsmittel über vorgeschaltete Überstrom-Schutzeinrichtungen oder RCDs abschalten. Das TT-System ist für die industrielle Anwendung von untergeordneter Bedeutung. Beim TT-System ist die Abschaltbedingung erfüllt, wenn der Erdungswiderstand kleiner oder gleich ist, als die dauernd zulässige Berührungsspannung dividiert durch den Nennfehlerstrom der RCD.

Wenn eine Überstrom-Schutzeinrichtung für den Fehlerschutz (Schutz bei indirektem Berühren) verwendet wird, muss die folgende Bedingung erfüllt werden:

$$Z_s \leq \frac{U_0}{I_a} \quad (17.2)$$

Schleifenimpedanz besteht aus:

- der Stromquelle,
- dem Außenleiter bis zum Fehlerort,
- dem Schutzleiter der Körper,

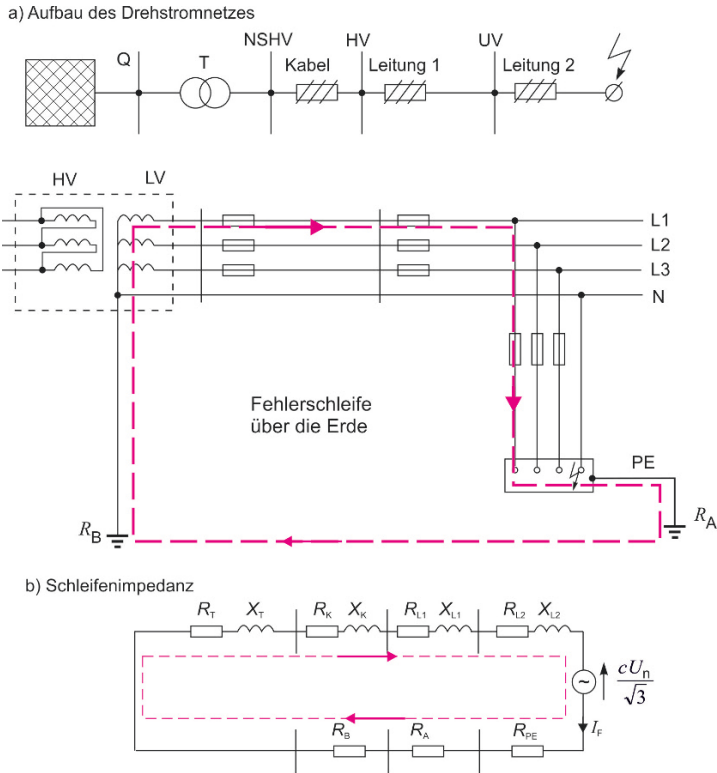


Bild 17.5: Netzaufbau und Ersatzschaltung des TT-Systems

- dem Erdungsleiter,
- dem Anlagenerder und
- dem Erder der Stromquelle.

Erdungswiderstand mit einer RCD:

$$R_A \leq \frac{50 \text{ V}}{I_{\Delta n}} \quad (17.3)$$

Erdungswiderstand bei selektiver RCD

$$R_A \leq \frac{U_T}{2 I_{\Delta n}} \quad (17.4)$$

17.7 Abschaltzeiten

Die maximal zulässigen Abschaltzeiten für Stromkreise in TN- und TT-Systemen mit einer Bemessungsspannung von 400/230 V sind in **Tabelle 17.1**, die Kenn-

größen für die Abschaltbedingungen in Endstromkreisen bis 32 A und die Auswahl der Schutzeinrichtungen in **Tabelle 17.2** zusammengestellt.

Tabelle 17.1: Bemessungsspannungen und maximale Abschaltzeiten für TN,- und TT-Systeme

System	$120\text{ V} < U_0 \leq 230\text{ V}$	$230\text{ V} < U_0 \leq 400\text{ V}$
TN	0,4 s	0,2 s
TT	0,2 s	0,07 s

In TN-Systemen ist eine Abschaltzeit nicht länger als 5 s für Verteilerstromkreise vorgesehen.

In TT-Systemen ist eine Abschaltzeit nicht länger als 1 s für Verteilerstromkreise vorgesehen.

Tabelle 17.2: Merkmale von TN,- und TT-Systemen

Kenngroßen	TN-System	TT-System
Impedanz der Fehlerschleife	$< 2\ \Omega$	$> 200\ \Omega$
Fehlerstrom	$< 2\text{ kA}$	abhängig von Betriebs- und Schutzerdung
Berührungsspannung	bis 115 V	115 V bis 230 V
Berührungstrom bei 1000 Ω Körperimpedanz	bis 115 mA	115 A bis 230 A
Personenschutz	für alle Steckdosen-Stromkreise 30 mA/RCD erforderlich	für alle Steckdosen, und Lichtstromkreise 30 mA/RCD erforderlich
Leitungsschutz	Überstromschutz-Einrichtungen erforderlich z. B. B 16 A-LS-Schalter	Überstromschutz-Einrichtungen erforderlich z. B. B 16 A-LS-Schalter

17.8 Schutzklassen

Schutz gegen elektrischen Schlag unter Fehlerbedingungen wird mit der Schutzklasse gekennzeichnet (**Bild 17.6**).

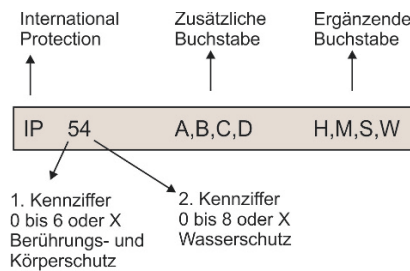
- 1. Schutzklasse I: Der Körper (Gehäuse) des Verbrauchers wird mit dem Schutzleiter (PE) verbunden, z. B. Steckdose oder Motor.

**Bild 17.6:** Schutzklassen

2. Schutzklasse II: Der Körper (Gehäuse) des Verbrauchers wird mit dem Schutzleiter (PE) nicht verbunden. Der Verbraucher verfügt über eine Basisisolierung, z. B. Leuchten.
3. Schutzklasse III: Der Verbraucher wird an eine Kleinspannung von 50V, SELV (Safety Extra Low Voltage) oder PELV (Protective Extra Low Voltage) angeschlossen, z. B. Spielzeuge.

17.9 Schutzart

Durch die Angabe der Schutzart wird die Güte der Basisisolierung (Basisschutz) gegen Eindringen von Fremdkörpern und Wasser in das Gerät beschrieben. Nach EN 60529 wird die Schutzart mit einer Buchstaben-Ziffern-Kombination angegeben (**Bild 17.7**).

**Bild 17.7:** Schutzart

Beispiel: IP 54 C S bedeutet, dass das Gerät

5: staubgeschützt,

4: geschützt gegen Spritzwasser,

C: geschützt gegen Zugang mit Werkzeug und

S: geprüft auf schädliche Wirkungen durch Eintritt von Wasser, wenn die beweglichen Teile des Betriebsmittels im Stillstand sind.

17.10 Fehlerberechnung

In diesem Kapitel werden TN- und TT-Systeme praxisnahe untersucht und die möglichen Fehlerarten berechnet. Beide Anlagen werden vorschriftsmäßig geerdet und die leitfähigen berührbaren Teile mit der Haupterdungsschiene verbunden.

17.10.1 Berechnung eines TN-Systems

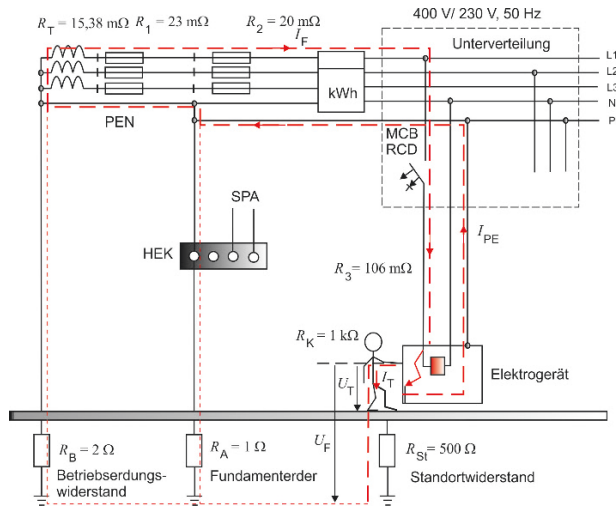


Bild 17.8: TN-System mit Schutzpotentialausgleich

Bei der Berechnung werden nur die Ohmschen Widerstände berücksichtigt (**Bild 17.8**).

Der Gesamtwiderstand des Netzes beträgt:

$$R_G = R_T + R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_G = 15,38 \text{ m}\Omega + 2 \cdot 23 \text{ m}\Omega + 2 \cdot 20 \text{ m}\Omega + 2 \cdot 106 \text{ m}\Omega = 313,39 \text{ m}\Omega$$

Die Fehlerstrom ist:

$$I_F = \frac{U_0}{R_G} = \frac{230 \text{ V}}{313,39 \text{ m}\Omega} = 734 \text{ A}$$

Der Fehlerstrom im Schutzleiter (PE) beträgt:

$$I_{PE} = \frac{R_K}{R_{PE} + R_K} \cdot I_F = \frac{1000\Omega}{0,106 \Omega + 1000\Omega} \cdot 734 \text{ A} = 733,92 \text{ A}$$

Der Berührungstrom im menschlichen Körper:

$$I_T = I_F - I_{PE} = 734 \text{ A} - 733,92 \text{ A} = 80 \text{ mA}$$

Bei diesem Fehlerstrom kann Herzkammerflimmern auftreten, wenn die Einwirkdauer länger als 1 s dauert.

17.10.2 Berechnung eines TT-Systems

Mit der gleichen Anlage berechnen wir jetzt ein TT-System (**Bild 17.9**), in dem die Fehlerströme über die Erde fließen.

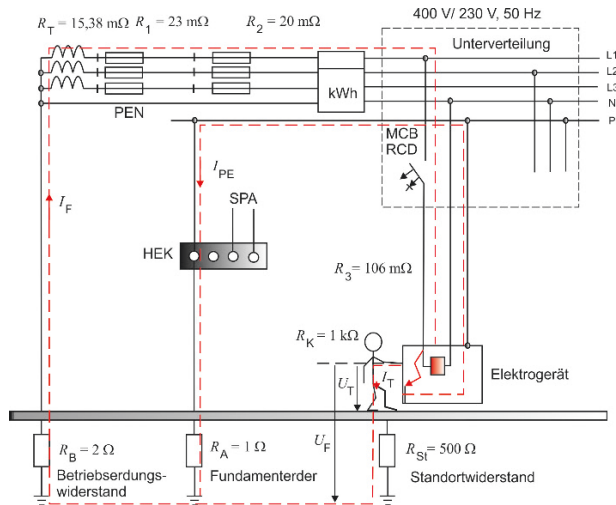


Bild 17.9: TT-System mit Schutzpotentialausgleich

Der Fehlerstrom im Netz:

$$I_F = \frac{U_0}{R_{\text{Netz}} + R_A + R_B} = \frac{230 \text{ V}}{0,178 \Omega + 1 \Omega + 2 \Omega} = 72,37 \text{ A}$$

Die Fehlerspannung beträgt:

$$U_F = \frac{R_A}{R_A + R_B} \cdot U_0 = \frac{1 \Omega}{1 \Omega + 2 \Omega} \cdot 230 \text{ V} = 76,66 \text{ V}$$

Die Berührungsspannung ist:

$$U_T = \frac{R_{PE}}{R_{PE} + R_A} \cdot U_F = \frac{0,106 \Omega}{0,106 \Omega + 1 \Omega} \cdot 76,66 V = 7,35 V$$

Der Fehlerstrom im Schutzleiter:

$$I_{PE} = \frac{R_K}{R_{PE} + R_K + R_A} \cdot I_F = \frac{1000 \Omega}{0,106 \Omega + 1000 \Omega + 1 \Omega} = 72,29 A$$

Der Berührungsstrom im menschlichen Körper:

$$I_T = I_F - I_{PE} = 72,37 A - 72,29 A = 80 mA$$

Es kann vorkommen, dass der Schutzleiter unterbrochen wird. In diesem Fall werden die Fehler wie folgt berechnet.

Fehlerspannung:

$$U_F = \frac{R_K + R_A}{R_K + R_A + R_B} \cdot U_0 = \frac{1000 \Omega + 1 \Omega}{1000 \Omega + 1 \Omega + 2 \Omega} = 229,54 V$$

Berührungsspannung:

$$U_T = \frac{R_K}{R_K + R_A} \cdot U_F = \frac{1000 \Omega}{1000 \Omega + 1 \Omega} \cdot 229,54 V = 229,31 V$$

Fehlerstrom insgesamt, der durch den menschlichen Körper fließt:

$$I_F = \frac{U_0}{R_K + R_A + R_B} = \frac{230 V}{1000 \Omega + 1 \Omega + 2 \Omega} = 229,31 mA$$

Wie man sieht, erhöht sich die Berührungsspannung ohne den Schutzleiter und gleichzeitig sinkt der Fehlerstrom ab, der ohne Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCD) nicht abgeschaltet werden kann.

Wobei

- I_F : Fehlerstrom in A
- U_T : Berührungsspannung (alt U_B) in V
- I_T : Berührungsstrom (alt I_K) in A

R_{PE} : Widerstand des Schutzleiters in Ω

R_T : Widerstand des Transformators in Ω

R_B : Betriebserdungswiderstand in Ω

R_A : Schutzerdungs-(Ausbreitungs)widerstand in Ω

18 Niederspannungsschutzeinrichtungen

Schutzeinrichtungen in elektrischen Anlagen werden eingesetzt, um Lebewesen, Kabel und Leitungen, Verbraucher vor gefährlichen Überströmen zu schützen. Überströme werden eingeteilt in Überlast- und Kurzschlussstrom (**Bild 18.1**).

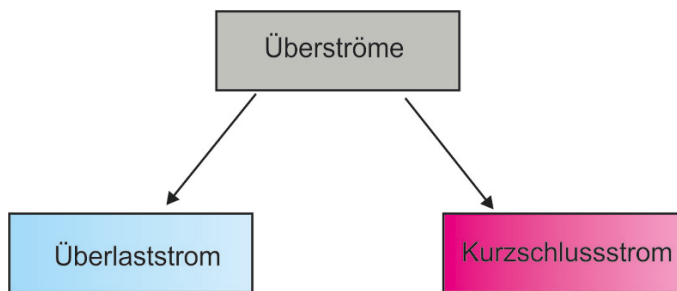


Bild 18.1: Fehlerarten

Der Überlaststrom ist größer als der Bemessungsstrom und entsteht im fehlerfreien Betriebszustand. Hohe Belastung eines Motors oder gleichzeitige Benutzung mehrerer Betriebsmittel kann zu einer Überlastung des Kabels oder der Leitung führen. Nach DIN EN 60909-0 wird ein Kurzschlussstrom hervorgerufen durch einen Kurzschluss in einem elektrischen Netz.

Ein Kurzschlussstrom entsteht zufällig oder absichtlich durch einen Strompfad zwischen zwei oder mehreren leitfähigen Teilen, wobei die elektrischen Potentialdifferenzen zwischen diesen Teilen auf Null oder nahezu Null abfallen.

Durch den Einsatz von Überstrom-Schutzeinrichtungen in elektrischen Anlagen werden Überströme sofort abgeschaltet, die in diesem Abschnitt beschrieben werden.

18.1 Leitungsschutzschalter (MCB)

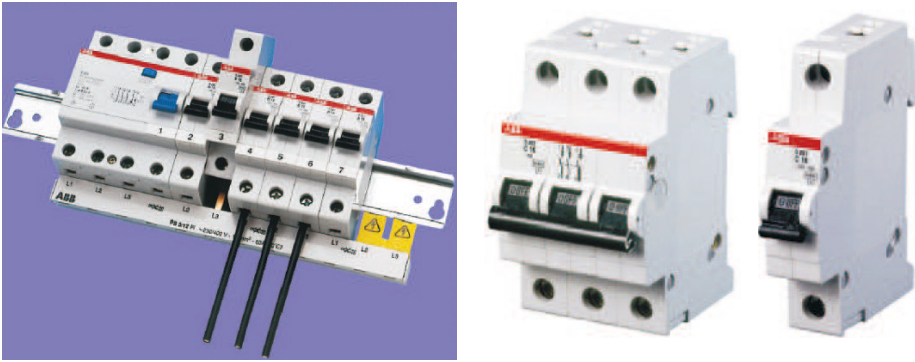


Bild 18.2: Bilder von MCBs [105]

Ein Leitungsschutzschalter ist eine Kombination aus einem Thermo-Bimetal-Auslöser und einem Elektromagnetauslöser. Die einzelnen Auslösecharakteristiken ergeben sich zusammen eine Auslösekennlinie. Für den Bereich der Überströme (Überlast) kommt der Thermo-Bimetalauslöser und für den Bereich der Kurzschlussströme der Elektromagnetauslöser zum Einsatz. Für Beleuchtungs- und Steckdosenstromkreise werden Leitungsschutzschalter mit B-Auslösecharakteristik eingesetzt. Für Motoren mit Einschaltströmen wird C- oder K-Auslösecharakteristik eingesetzt. So kann der abgesicherte Stromkreis nach Beseitigung einer Störung unverzüglich ohne Auswechselung irgendwelcher Teile vom Anlagenbetreiber wieder in Betrieb genommen werden.

Niederspannungs-Leitungsschutzschalter [33] (MCB - Miniature Circuit Breaker) nach IEC 60898-1 (VDE 0641-11) können nach ihrer Arbeitsweise in stark strombegrenzend und schwach strombegrenzend (**Bild 18.2**) unterschieden werden und ihre Schutzfunktionen werden durch elektromechanische Auslöser bestimmt (**Bild 18.3**). Den Überlastschutz übernimmt ein stromabhängig verzögerter Überlastauslöser, z. B. ein Bimetallauslöser. Den Kurzschlussschutz übernimmt ein unverzögerter Überstromauslöser, z. B. ein Magnetauslöser. Für die Abschaltung der Überlast und des Kurzschlussstromes müssen die Stromstärken der Überlast- und der Kurzschlussauslösung ermittelt werden (**Tabelle 18.1**). Sie werden mit Bemessungsströmen von 0,5 A bis 125 A bestimmt.

18.2 Planungsgrundlagen von Schutzgeräten

Die thermischen Auslöser B und C sind auf eine Bezugsumgebungstemperatur von 30°C eingestellt. Bei anderen Umgebungstemperaturen ändern sich die an-

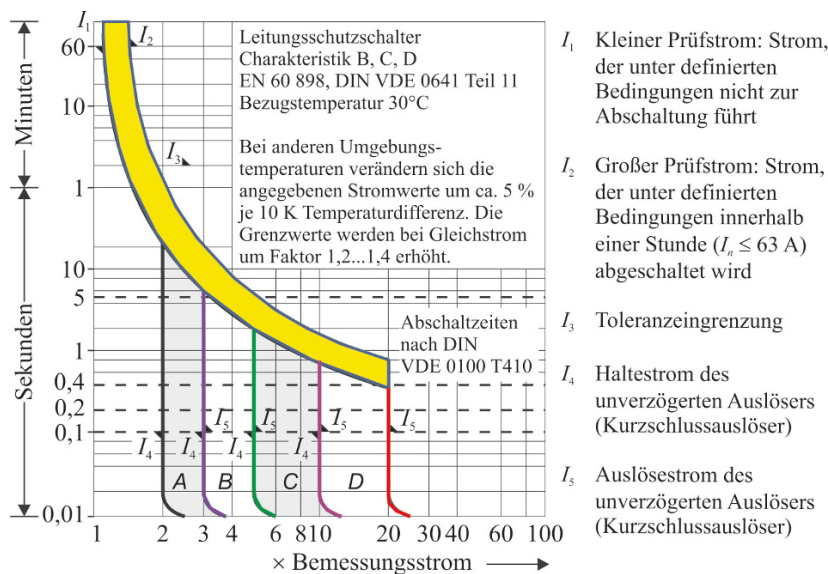


Bild 18.3: Kennlinien von MCBs [105]

Tabelle 18.1: ÜSE, großer Prüfstrom und Abschaltströme (k-Faktoren), (ÜSE: Überstrom-Schutzeinrichtung)

ÜSE	verzögerter thermischer Auslöser (Überlastschutz)	kurzverzögerter magnetischer Auslöser (Kurzschlussschutz)
	I_2	I_5
A	$1,45 I_n$	$3 I_n$
B	$1,45 I_n$	$5 I_n$
C	$1,45 I_n$	$10 I_n$
D	$1,45 I_n$	$20 I_n$
Z	$1,2 I_n$	$3 I_n$
K	$1,2 I_n$	$15 I_n$
E	$1,2 I_n$	$6,25 I_n$

gegebenen Stromwerte um ca. 6% je 10°C Temperaturdifferenz (Bild 18.4). Bei der Installation von Leitungsschutzschaltern und bei dichter Aneinanderreihung und gleichmäßig hoher Auslastung der FI/LS-Schalter muss ein Korrekturfaktor berücksichtigt werden (Bild 18.5). Bei Belastungen > 1 h mit dem Bemessungsstrom I_n muss der Strom bei jeweiligen Umgebungstemperatur mit dem Faktor 0,9 multipliziert werden [33].

B und C	Umgebungstemperatur T (°C)											
	- 40	- 30	- 20	- 10	0	10	20	30	40	50	60	70
I _n (A)												
0,5	0,67	0,65	0,62	0,60	0,58	0,55	0,53	0,50	0,47	0,44	0,41	0,37
1,0	1,33	1,29	1,25	1,20	1,15	1,11	1,05	1,00	0,94	0,88	0,82	0,75
1,6	2,13	2,07	2,00	1,92	1,85	1,77	1,69	1,60	1,51	1,41	1,31	1,19
2,0	2,67	2,58	2,49	2,40	2,31	2,21	2,11	2,00	1,89	1,76	1,63	1,49
3,0	4,0	3,9	3,7	3,6	3,5	3,3	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2
4,0	5,3	5,2	5,0	4,8	4,6	4,4	4,2	4,0	3,8	3,5	3,3	3,0
6,0	8,0	7,7	7,5	7,2	6,9	6,6	6,3	6,0	5,7	5,3	4,9	4,5
8,0	10,7	10,3	10,0	9,6	9,2	8,8	8,4	8,0	7,5	7,1	6,5	6,0
10,0	13,3	12,9	12,5	12,0	11,5	11,1	10,5	10,0	9,4	8,8	8,2	7,5
13,0	17,3	16,8	16,2	15,6	15,0	14,4	13,7	13,0	12,3	11,5	10,6	9,7
16,0	21,3	20,7	20,0	19,2	18,5	17,7	16,9	16,0	15,1	14,1	13,1	11,9
20,0	26,7	25,8	24,9	24,0	23,1	22,1	21,1	20,0	18,9	17,6	16,3	14,9
25,0	33,3	32,3	31,2	30,0	28,9	27,6	26,4	25,0	23,6	22,0	20,4	18,6
32,0	42,7	41,3	39,9	38,5	37,0	35,4	33,7	32,0	30,2	28,2	26,1	23,9
40,0	53,3	51,6	49,9	48,1	46,2	44,2	42,2	40,0	37,7	35,3	32,7	29,8
50,0	66,7	64,5	62,4	60,1	57,7	55,3	52,7	50,0	47,1	44,1	40,8	37,3
63,0	84,0	81,3	78,6	75,7	72,7	69,6	66,4	63,0	59,4	55,6	51,4	47,0

Bild 18.4: Abweichende Umgebungstemperatur [33]

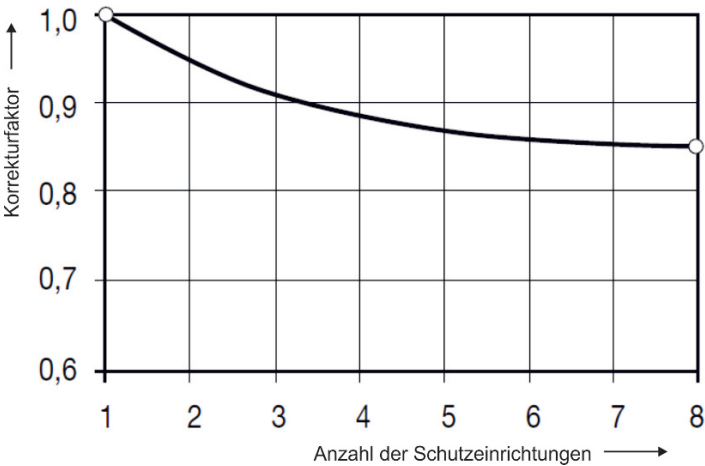


Bild 18.5: Gegenseitige Beeinflussung [33]

Beispiel: Ein 8 x 16-A-Leitungsschutzschalter hat bei einer Umgebungstemperatur von 50°C eine Belastbarkeit von $I_n = 14,1 \text{ A} \cdot 0,9 \cdot 0,85 = 11,38 \text{ A}$. Somit müssen die Bemessungsregeln beachtet werden.

Leitungsschutzschalter können nach der Auslösung wieder eingeschaltet werden. Sie haben einen thermischen- (Überlastauslöser) und elektromagnetischen Auslöser (Kurzschlussauslöser).

18.3 Schmelzsicherungen

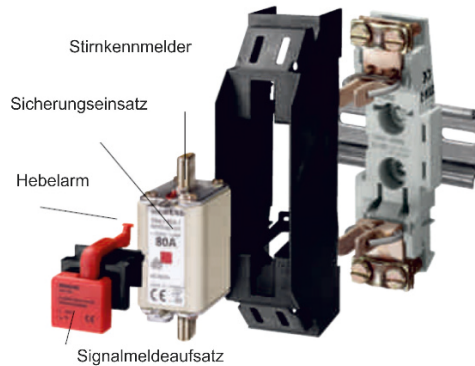


Bild 18.6: Sicherungen

NH-Sicherungen (**N**iederspannungs-**H**ochleistungssicherungen) nach IEC 60269-2/VDE 0636-2x (**Bild 18.6**) haben ein hohes Kurzschlussausschaltvermögen und begrenzen durch ihr schnelles Abschmelzen den Kurzschlussstrom sehr stark. Die Schutzkennlinie ist durch die Auswahl der Betriebsklasse der NH-Sicherung - z. B. Ganzbereichssicherung als Überlast- und Kurzschlussschutz oder Teilbereichssicherung nur als Kurzschlussschutz - und des Bemessungsstroms gegeben. Die Zeit-Strom-Kennlinien sind in **Bild 18.7** gezeigt. Eine Schmelzsicherung enthält einen Draht aus leicht schmelzbarem Material, der innerhalb eines Porzellangehäuses eingespannt ist. Das Gehäuse ist mit Quarzsand gefüllt, damit der Schmelzfunke nicht nach außen treten kann. Die Dicke des Drahtes hängt von der Bemessungsstärke der Sicherung ab.

Sicherungen müssen für alle Außenleiter gleiche Bauart und gleichen Bemessungsstrom haben und dürfen nicht überbrückt werden. Nach der Auslösung sind sie nicht mehr einsatzfähig.

Bei den Bauarten werden drei Ausführungsarten unterschieden:

1. NH-System: Sicherung mit Messerkontakten (von Laien nicht bedienbar).
2. D-System (Diazed): Schraubsicherung (von Laien bedienbar).
3. D0-System (Neozed): Schraubsicherung (von Laien bedienbar).

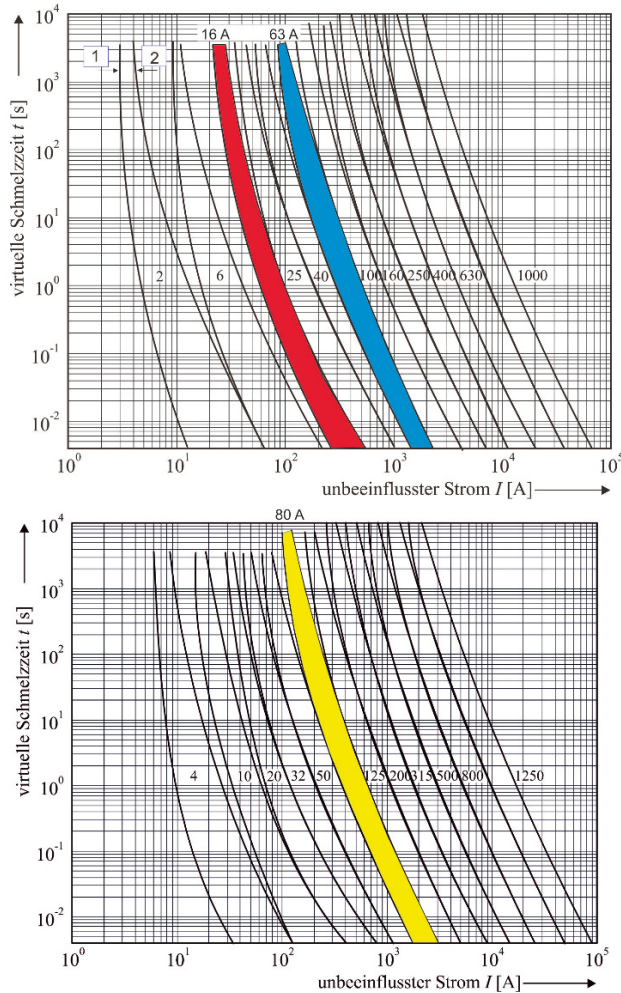


Bild 18.7: Kennlinien von Sicherungen mit Bändern

18.4 RCD (Fehlerstromschutzschalter)

Das Prinzip der Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) besteht darin, dass im normalen Betrieb die Summe der in die Anlage hineinfließenden Ströme ein Magnetfeld erzeugt, das durch die das Magnetfeld zurückfließenden Ströme aufgehoben wird (**Bild 18.8**). Wird das System durch einen Fehler gestört, so dass ein Teil der Ströme nicht über die Rückleitung, sondern über den Schutzleiter zurückfließt, wird durch das verbleibende Magnetfeld eine Spannung induziert, die das Ansprechen eines magnetischen Auslösers und damit ein Ausschalten der Netzspannung bewirkt.

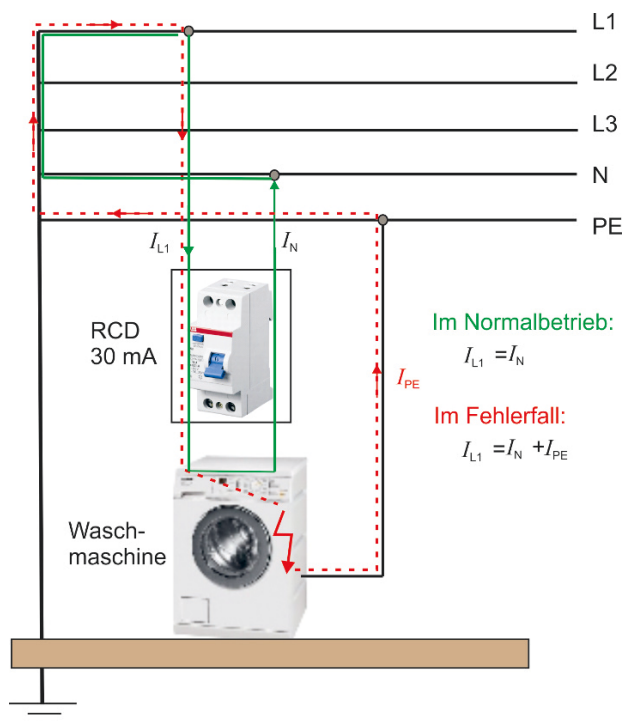


Bild 18.8: Fehlerstrom-Schutzeinrichtung

18.5 Auswahl und Installation von RCDs

Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs) müssen nach DIN VDE 0100 Teil 530 so ausgewählt und die elektrischen Stromkreise einer RCD oder mehreren RCDs müssen so zugeordnet sein, dass im vorgesehenen Normalbetrieb einer nach den Normen der Reihe DIN VDE 0100 (VDE 0100) errichteten Anlage ein unerwünschtes Abschalten unwahrscheinlich ist. Um unerwünschtes Abschalten durch Schutzleiterströme und/oder Erdableitströme zu vermeiden, darf deren Summe auf der Lastseite der Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) nicht mehr als das 0,4fache des Bemessungsfehlerstroms betragen. Gegebenfalls muss eine Aufteilung der Stromkreise auf mehrere Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs) erfolgen. Bei Einschaltvorgängen kann es durch das Laden von Ableitkapazitäten oder durch andere elektromagnetische Störungen zum Auslösen der Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs) kommen. Zur Vermeidung von unerwünschtem Abschalten fehlerfreier Stromkreise siehe auch DIN VDE 0100-535.2.1. In Anlagen mit Überspannungsschutzeinrichtungen (SPDs) sind diese auf der Versorgungsseite von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs) zu errichten (siehe DIN VDE 0100-534 (VDE 0100 Teil 534)). Die Abschaltkurven einer 30-mA-RCD mit einer selektiven 300-mA-RCD sind in **Bild 18.9** dargestellt.

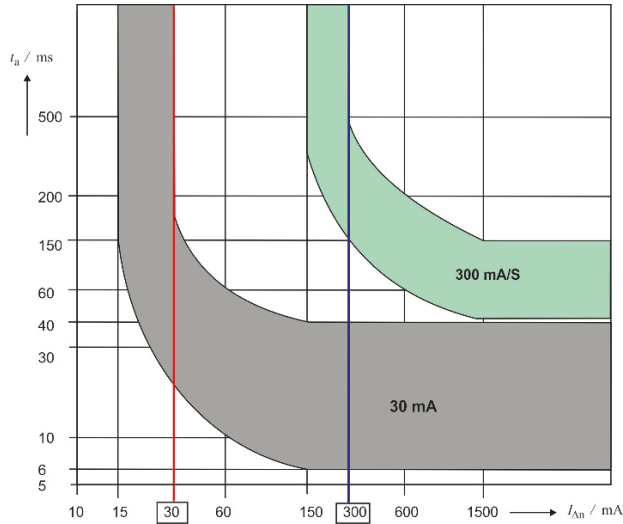


Bild 18.9: Abschaltkurven von RCDs

18.6 Anwendung der RCD in Wohngebäuden

DIN 18015-1: Teil 1 Planungsgrundlagen:

Die Zuordnung von Anschlussstellen für Verbrauchsmittel zu einem Stromkreis ist so vorzunehmen, dass durch das automatische Abschalten der diesem Stromkreis zugeordneten Schutzeinrichtung (z. B. Leitungsschutzschalter, Fehlerstrom-Schutzschalter) im Fehlerfall oder bei notwendiger manueller Abschaltung nur ein kleiner Teil der Kundenanlage abgeschaltet wird. Hiermit wird die größtmögliche Verfügbarkeit der elektrischen Anlage für den Nutzer erreicht.

Um Selektivität in einer elektrischen Anlage bei einer Hintereinanderschaltung von Schutzgeräten zum Überstromschutz und zum Schutz gegen elektrischen Schlag (wie Leitungsschutzschalter und Fehlerstrom-Schutzschalter) zu erreichen, ist der Einsatz von Geräten mit entsprechenden Selektiveigenschaften erforderlich.

DIN 18015-2: Teil 2 Mindestausstattung in Wohngebäuden:

Die Zuordnung von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen zu den Stromkreisen ist so vorzunehmen, dass das Abschalten eines Fehlerstrom-Schutzschalters nicht zum Ausfall aller Stromkreise führt. Ausgenommen sind selektive Fehlerstrom-Schutzschalter. Ein zentraler 30mA-RCD vor der gesamten Wohnungsinstallation ist nach DIN 18015 nicht zulässig.

18.7 Hauptleitungs-Schutzschalter

Hauptleitungs-Schutzschalter [34] (SH-Schalter) werden im unteren Anschlussraum des Zählerplatzes anstelle der NH-Sicherungen eingesetzt. Sie arbeiten selektiv zu nachgeschalteten Überstrom-Schutzeinrichtungen (**Bild 18.10**).

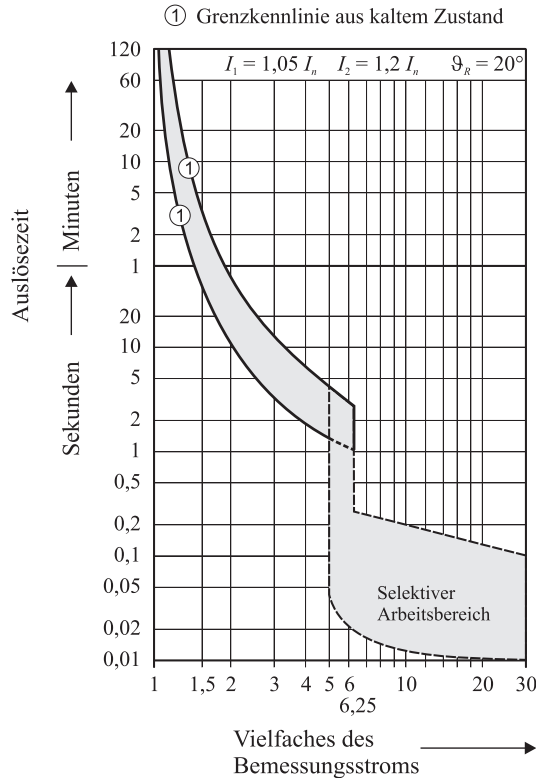


Bild 18.10: Zeit-Strom-Kennlinie des Hauptsicherungsautomaten S750

18.8 Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtung (AFDD)

In elektrischen Anlagen entstehen häufig parallele und serielle Fehlerlichtbögen durch fehlerhafte Isolierung aktiver Leiter oder durch lose Verbindungen. RCDs können serielle Lichtbögen nicht erkennen, da kein Ableitstrom zur Erde entsteht. Dieser Fehlerstrom kann auch nicht von ÜSE abgeschaltet werden, da der Auslösestrom sehr klein ist. Diese Fehlerzustände können nur AFDDs erkennen und rechtzeitig abschalten.

DIN VDE 0100-420:2016-02 beschreibt Anlagen, in denen eine erhöhte Brand-

gefahr besteht, sich Feuer leicht verbreiten kann, eine erhöhte Gefährdung für Personen besteht oder wertvolle Güter geschützt werden sollen, empfiehlt den Einsatz von Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtungen (AFDD) und schreibt sie für bestimmte Bereiche mit erhöhter Brandgefahr vor.

In folgenden Endstromkreisen sind AFDDs bis 16 A Betriebsstrom vorzusehen:

- In Schlafräumen, Heimen und Tageseinrichtungen.
- In Schlafräumen oder Aufenthaltsräumen von barrierefreien Wohnungen.
- In Räumen und Orten mit einem Feuerrisiko, mit brennbaren Baustoffen und für unersetzbare Güter.

Für Waschmaschinen, Trockner und Geschirrspüler können AFDDs empfohlen werden. In dreiphasigen Wechselspannungssystemen (Drehstromkreise) ist der Einsatz von AFDDs nach der Norm nicht vorgesehen. Die Funktionsprüfung muss beim AFDD nicht durchgeführt werden. Der AFDD führt zyklisch einen Selbsttest durch.

Bild 18.11 zeigt Fehlerlichtbögen und eingeführte Schutzeinrichtungen. Eine Kombination von Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtung (AFDD), Leitungsschutzschalter (MCB) und Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) bieten den höchstmöglichen Schutz sowohl für Personen als auch für Anlagen und Geräte.

Bild 18.11c zeigt den prinzipiellen Aufbau der Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtung. Zur Erfassung der Fehler werden Außenleiter und der Neutralleiter durch das Gerät geführt und geschaltet. Der Außenleiter wird durch zwei getrennte Sensoren geführt, wobei ein Stromsensor zur Erfassung der niederfrequenten (netz-frequenten) Signale und ein HF-Sensor zur Erfassung der hochfrequenten Signale dient. Eine Analogelektronik nimmt die Vorbereitung der Signale vor, die dann im Mikrocontroller verarbeitet werden. Die HF-Leistung des Stroms wird im MHz-Bereich abgetastet und im Folgenden als RSSI (Received Signal Strength Indication) bezeichnet. Sie repräsentiert die Leistung des Lichtbogens bei einer definierten Frequenz und Bandbreite. Wenn der Mikrocontroller die Kriterien für einen Fehlerlichtbogen als erfüllt erkannt hat, wird das Auslösesignal erzeugt und über einen Arbeitsstromauslöser der Schaltmechanismus angesteuert. Im Fall des Brandschutzschalters wird ein mechanisches Koppelglied, welches auf die Mechanik des angebauten LS- oder RCD/LS-Schalters wirkt, betätigt. Es löst den angebauten Schutzschalter mit seinen Kontakten aus und trennt das Netz vom fehlerhaften Anlagenteil [43].

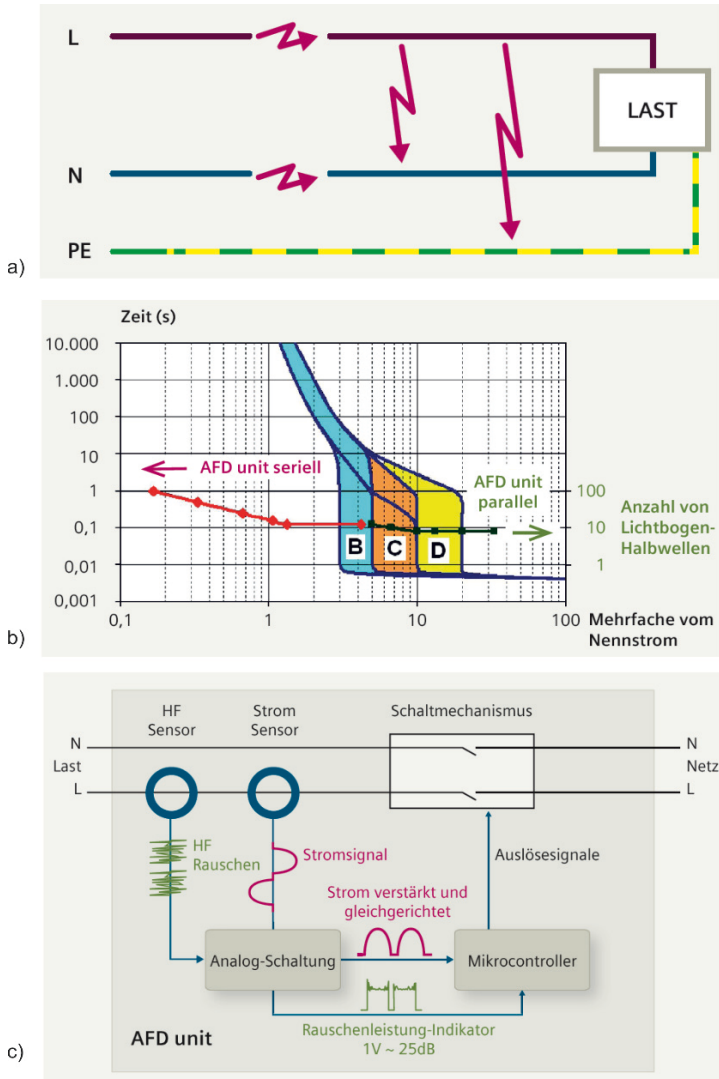


Bild 18.11: AFDD, MCB und MCB-Kombination [43]

a) Arten von Fehlerlichtbögen, b) Schutz durch Leitungsschutzschalter, c) Prinzipieller Aufbau des AFDDs

18.9 Leistungsschalter (MCCB)

Leistungsschalter können alle Ströme im Rahmen ihrer Bemessungswerte ein- und ausschalten, angefangen von kleinen induktiven und kapazitiven Lastströmen bis hin zum vollen Kurzschlussstrom; und das unter allen Fehlerbedingungen im Netz wie z. B. Erdschlüsse. Leistungsschalter dienen vor allem dem Kurzschlusschutz, dem Schutz gegen Überlast, dem Fehlerschutz und dem Schutz vor Unterspan-

nung. Die thermischen und magnetischen Auslöser sind Bestandteile dieser Schalter. Leistungsschalter müssen Betriebsmittel und Anlagenteile im ungestörten und gestörten Zustand sicher schalten, d.h. sie müssen auch einen Kurzschluss sicher abschalten. Zum Löschen des Lichtbogens benutzt man bei Niederspannung schnelles Öffnen der Kontakte, Magnet-Blassspulen und Löschbleche [37], [38]. Leistungsschalter (IEC 60947-2 / VDE660-101) für Energieverteilungsanlagen unterscheiden sich im Wesentlichen in

- der Bauart (offene oder kompakte Bauform),
- der Einbauart (Festeinbau, steckbar, Einschub),
- dem Bemessungsstrom (max. Nennstrom des Schalters),
- der Strombegrenzung:
strombegrenzend (MCCB; Molded Case Circuit Breaker) oder nicht strombegrenzend (ACB; Air Circuit Breaker),
- den Schutzfunktionen der Kommunikationsfähigkeit (Fähigkeit der Datenübertragung aus und in den Schalter),
- der Gebrauchskategorie (A oder B, siehe IEC 60947-2).

18.10 Auslöser/Schutzfunktion des Leistungsschalters

Die Schutzfunktion des Leistungsschalters (**Bild 18.12**) im Energieverteilungsnetz wird durch die Wahl des entsprechenden Auslösers bestimmt. Die Auslöser werden unterschieden in thermomagnetische Auslöser (früher auch als elektromechanische Auslöser bezeichnet) und elektronische Auslöser (ETU). **Bild 18.13** zeigt die Auslösertypen von Leistungsschaltern.

- Überlastschutz Bezeichnung: L (Long Time Delay); auch Stromabhängig verzögerte Überlastauslöser werden je nach Auslösertyp mit optionalen Kennlinien angeboten.
- Neutralleiterschutz Bezeichnung N (neutral) stromabhängig verzögerte Überlastauslöser für den Neutralleiter werden mit der Abhängigkeit 50 % und 100 % des Überlastauslösers angeboten.
- Kurzschlusschutz, unverzögert Bezeichnung: I (Instantaneous); Beispiel: Magnetauslöser. Je nach Applikation werden I-Auslöser sowohl mit fester, einstellbarer als auch mit Off-Funktion angeboten.
- Kurzschlusschutz, verzögert Bezeichnung: S (Short Time Delay); Für eine zeitliche Anpassung von Schutzfunktionen in Reihe. Neben den Standardkennlinien und Einstellungen werden auch optionale Funktionen für bestimmte Applikationen angeboten.

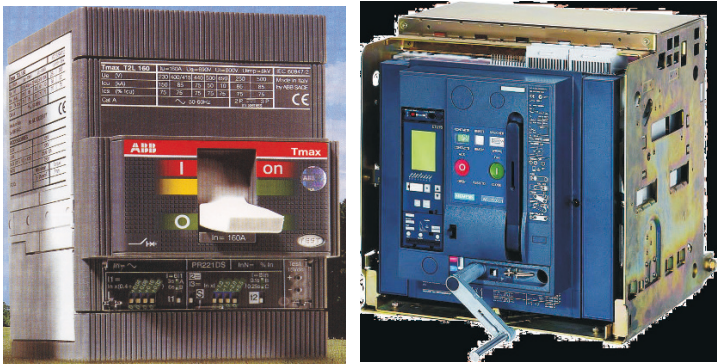


Bild 18.12: Leistungsschalter

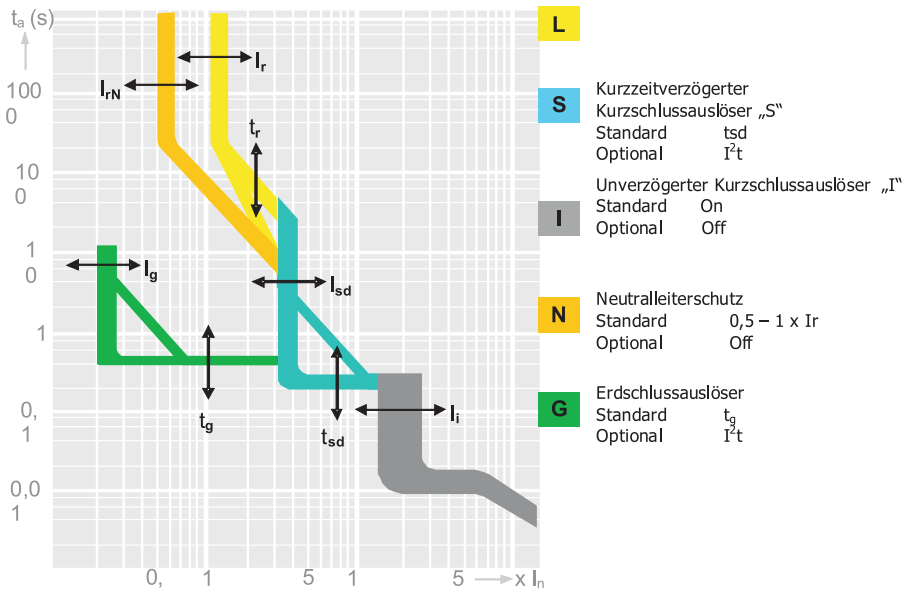


Bild 18.13: Zeit-Stromkennlinien von Leistungsschaltern



19 Übertragungsmittel

In diesem Kapitel werden die Übertragungsmittel für Elektroenergie (Freileitungen, Kabeltypen) kurz beschrieben.

19.1 Freileitungen

Freileitungen übertragen die elektrischer Energie von der Erzeugung bis zur Verteilung. Eine Freileitung besteht aus Masten, oberirdisch verlegten Leitungen, Isolatoren und Erdungen. Bei den Masten unterscheidet man zwischen Tragmasten, die Leiterseile und Isolatoren bei gerader Leitungsführung tragen, und Abspannmasten, die Festpunkte im Leitungsverlauf bilden und neben den Aufgaben der Tragmaste auch horizontale Seilkräfte aufnehmen können.

Endmasten werden bei Übergängen von Freileitungen auf Kabel eingesetzt. Als Tragwerke verwendet man für Niederspannungsleitungen einfache Holzmasten, für Mittelspannungsleitungen neben Holzmasten vorwiegend Betonmasten und für Hoch- und Höchstspannungsanlagen Stahlgittermasten.

Für Freileitungen werden meist blanke Drähte und Seile als Leiter verwendet. Als Leitermaterial ist Kupfer bei Nieder- und Mittelspannungsanlagen weitgehend durch Aluminium verdrängt worden.

Im Hoch- und Höchstspannungsbereich werden Aluminium/Stahl-Seile eingesetzt. Höchstspannungsanlagen werden heute vorwiegend als Bündelleiter ausgeführt, da Einseilleiter wegen der zu hohen Randfeldstärke sogenannte Koronaverluste und damit verbundene hochfrequente Störspannungen hervorrufen. Bei der Projektierung von Leitungsanlagen sind vornehmlich folgende Grundsatzfragen zu beantworten, die auf allen Netzspannungsebenen gleichermaßen gestellt werden müssen:

- Welche Abnehmerstruktur ist gegeben (z. B. Industrie, Gewerbe, Haushalt)
- Welche zeitliche und örtliche Verteilung der Belastung liegt vor?

- Über welche Entfernung müssen die Leistungen übertragen werden?
- Welche Leitungsarten können gewählt werden (örtliche Gegebenheiten, Wirtschaftlichkeit)?

Einflussgrößen der Leitungsbemessung sind [1, 86]:

- mechanische Festigkeit,
- thermische Beanspruchung,
- Spannungsfall,
- Verlustleistung,
- Abschaltbedingungen.

19.2 Kabel und Leitungen

Die Aderkennzeichnung von Starkstromkabeln und -leitungen nach VDE 0293-308:2003-01 wird in **Bild 19.1** gezeigt. Diese Kennzeichnung gilt europaweit für Kabel und Leitungen bis 1 kV für feste und flexible Verlegung in und am Gebäude. **Bild 19.2** zeigt Niederspannungskabel. Grundsätzlich ist jedes Kabel aus den drei Grundelementen Leiter, Isolierung und Schutzmantel aufgebaut (**Bild 19.3**). Die Werkstoffe und Ausführungen können unterschiedlich sein und gegebenenfalls durch spezielle Elemente ergänzt werden. Als Leiterwerkstoffe werden Kupfer und Aluminium verwendet. Der Leiteraufbau kann ein- oder mehrdrahtig, die Querschnittsform rund, oval, sektorförmig oder hohl sein (**Bild 19.4**). Querschnitte ab 25 mm^2 Cu werden ausschließlich mehrdrahtig ausgeführt, um eine ausreichende Biegefähigkeit sicherzustellen. Leitungen sind im Allgemeinen feindrahtiger als Kabel aufgebaut, da sie häufig für den flexiblen Einsatz vorgesehen werden.

Typenbezeichnung eines Starkstromkabels:

Bauartbezeichnung: NYCWY, NYY oder NYM

Leiterbezeichnung/Querschnitt: 4 x 120 mm^2

Bemessungsspannung: 20 kV oder 400 V

Nach Adern:

N : Normtyp

A : Aluminium, NAKLEY

Y : Polvvinylchlorid (PVC), NYM, NAYY

2X : Polyethylen (VPE), N2XSY

Einadrige Ausführung	
Schutzleiter	gn-ge
	
Neutralleiter	hbl
	
Außenleiter	br sw gr
	  

Aderzahl	Kennzeichnung
3	gn-ge bl br
	  
4	gn-ge br sw gr
	   
5	gn-ge bl br sw gr
	    
Beispiele: NYM-J, NYY-J, H07RN-F	

Bild 19.1: Kennzeichnung von Leitungen

Bezeichnung der Leiter:

Außenleiter: L1, L2, L3

Neutralleiter: N hellblau

Schutzleiter: PE(N) gelb/grün.

Buchstabenkurzzeichen nach DIN VDE 0250 für Leitungen:

- A Ader, Aluminiumumhüllung, Aluminiumader (Al)
- B Bleimantelleitung
- C konzentrische Leiter (abgeschirmt)
- D Drillingsleitung
- F feindrähtig, Fassungsader, Flachleitung
- G Gummihülle, 2-G-Silikonkautschuk (mit erhöhter Wärmebeständigkeit)
- H Hülle
- I Verlegung im Putz
- (J) Zusatz bei Mehraderleitungen mit gn-ge-farbenem Schutzleiter
- K Korrosionsschutz
- L für leichte mechanische Beanspruchung (z. B. Leuchtröhren)
- M Mantel, mittlere mechanische Beanspruchung
- N Normleitung
- (0) Zusatz bei Mehraderleitungen ohne gn-ge-farbenem Schutzleiter



Bild 19.2: Niederspannungskabelarten [87]

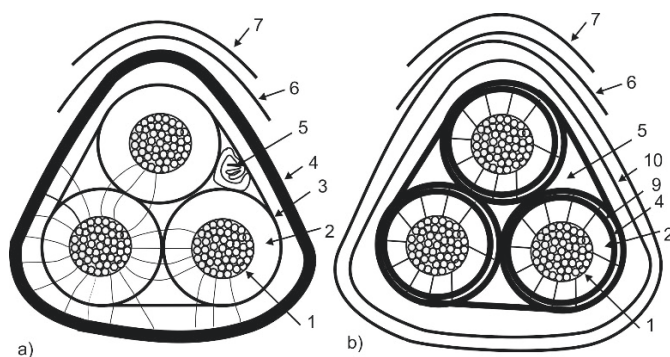


Bild 19.3: Schnitt von Kabeln a) Gürtelkabel b) Dreimantelkabel, 1) Leiter 2) Isolation 3) Gürtelisolierung 4) Mantel 5) Beilauf 6) Bewehrung 7) Außenhülle 8) Papier 9) Mantelumspinnung 10) Innenhülle

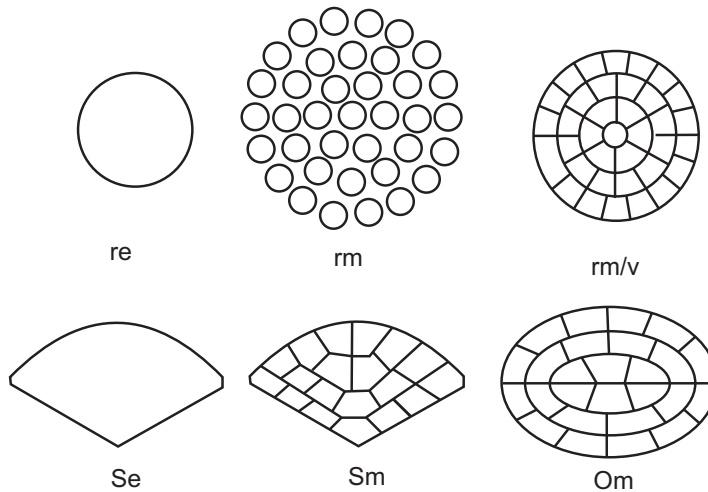


Bild 19.4: Leitungsarten, re) rm) om) rm) se) s rm/v)

ö	ölfest
P	Papierumhüllung
R	Rohrdraht, gefaltete Rohrumhüllung, gerillte Umhüllung
S	Schnur, Segeltuchhülle, für schwere mechanische Beanspruchung
T	Trosse
U	Umhüllung
U	unflammbar bzw -flammwidrig
V	Verdrahtungsleitung, verdrehbeanspruchungsfest
W	wetterfest
Y	Kunststoffisolierung (Thermoplaste wie Z.B. PVC usw.)
Z	Zinkmantel, Zwillingsader, Zugentlastung

Buchstabenkurzzeichen nach DIN VDE 0271 für Kabel:

A	nach N: Al-Leiter, am Ende: Außenhülle aus Jute
B	Stahlbandbewehrung
C	konzentrischer Leiter
CE	Einzeladerschirmung
D	Druckbandage aus Metallbändern
E	nach N: Einzeladerschirmung
fl	flammwidrig
Gb	Stahlbandgegenwende
H	Kabel mit metallisierten Einzeladern (Höchststädter Kabel)
K	Kabel mit Bleimantel
L	glatter Aluminiummantel

N	Normkabel
O	offene Stahldrahtbewehrung
Ö	Ölkabel
Q	Beflechtung aus verzinktem Stahldraht
R	Runddrahtbewehrung, Rostschutzanstrich
S	Kupferschirm (6mm^2) zwecks Berührungsschutz oder zur Fortleitung von Fehlerströmen
u	unmagnetisierbar
WK	Stahlwellenmantel
W	Kupferwellenmantel
w	wärmebeständig
2X	Isolierung aus vernetztem Polyethylen (VPE)
Y	Kunststoffisolierung
2Y	Isolierung aus thermoplastischem Polyethylen (PE)
YY	Kunststoffaußenmantel
Z	Bewehrung aus Stahlprofildraht

Tabelle 19.1: Verwendung von Kabeln und Leitungen

Kabeltyp	Verwendung
Mantelleitung NYM	in Rohren, auf, in und unter Putz, in trockenen, feuchten und nassen Räumen, im Mauerwerk und Beton, vor direkter Sonnenstahlung schützen
Kunststoffkabel NYY	im Erdreich und im Wasser sowie in Innenräumen
Kommunikationsleitung J-Y(St)Y	Im Sprech- und Nebenstellen vor direkter Sonnenstahlung schützen
MSR-Leitung PYCYM	Geschirmte, paarig verseilte Leitung zur Mess- und Regelung
Busleitung YCYM	Für Europäischen Installationsbus (KNX/EIB) vor direkter Sonnenstahlung schützen
Lichtwellenleiter LWL Twisted-Pair-Leitung (verdrilltes Aderpaar)	Digitale Übertragung, z. B. ISDN besteht aus 8, 24 oder 48 isolierten Adern
Gummischlauchleitung H05RR-F	Bei geringer mechanischer Belastung für Haushaltsgeräte und Büromaschinen
Kunststoffkabel mit konzentrischem Schutzleiter	Energiekabel für Hausanschlüsse und Straßenbeleuchtungsanlagen
Dreimantelkabel NAKBA	Energiekabel für MS-Anlagen

19.3 Kurzschlussbelastbarkeit von Kabeln

In **Tabelle 19.2** sind Werte für Kabeltemperaturen von PVC- und VPE-isolierten Kabeln angegeben, die für die Planung verwendet werden können.

Tabelle 19.2: Kabeltemperaturen

Isolierung	Kabeltyp und Nennspannung 0,6 kV/1-3,6 kV/6 kV $\leq 300 \text{ mm}^2$	Betriebs- temperatur $^{\circ}\text{C}$	End- temperatur $^{\circ}\text{C}$	Bemessungs- Kurzzeit- stromdichte für 1 s Cu-A/mm^2
PVC	Ein- und mehradrige Kabel	70	160	115
VPE	Ein- und mehradrige Kabel	90	250	143

20 Kenngrößen elektrischer Leitungen

Die elektrische Energie muss vom Ort der Bereitstellung bis zum Verbrauch möglichst ohne Verluste übertragen werden. Das erfordert die richtige Auswahl und Planung aller elektrotechnischen Komponenten. Dabei sollen auch die gültigen Normen und Vorschriften beachtet werden. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Charakteristiken der Energieverteilung besprochen (**Bild 20.1**).

Drehstrom-Freileitungen, Leitungen und Kabel bestehen aus Ohmschem, induktivem und kapazitivem Widerstand. In der Nieder- und Mittelspannung werden die Ohmschen und induktiven Widerstände berücksichtigt. In der Hochspannung sind noch Leiter-Erd-Kapazitäten und Betriebskapazitäten zu berücksichtigen.

Die elektrischen Charakteristiken von Übertragungsmitteln werden im folgenden kurz beschrieben.

20.1 Wirkwiderstand

Der Wirkwiderstand R_w wird aus dem Gleichstromwiderstand und bei Dreh- und Wechselstromsystemen zusätzlich aus dem Zusatzwiderstand (Stromverdrängung im Leiter und Wirbelströme im Metallmantel) bestimmt

Der Widerstand einer Leitung bei 20°C ist:

$$R_{20^\circ\text{C}} = \frac{l}{\kappa \cdot S} = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (20.1)$$

Die Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstandes ist:

$$R_{\vartheta} = R_{20^\circ\text{C}} [1 + \alpha (\vartheta - 20^\circ\text{C})] \quad (20.2)$$

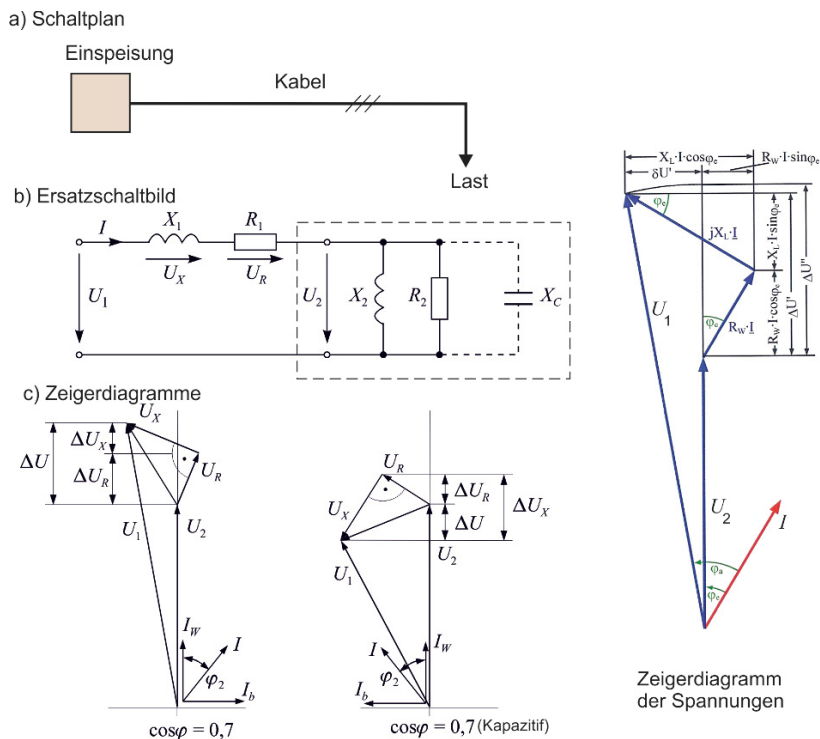


Bild 20.1: Energieverteilung und Spannungsfälle

20.2 Induktivität

Leitungen besitzen aufgrund der bei Wechselstrom entstehenden magnetischen Wechselfelder eine Induktivität L und damit auch einen induktiven Widerstand X_L .

$$X_L = \omega \cdot L \quad (20.3)$$

Die auf die längenbezogene Induktivität heißt Induktivitätsbelag L' in H/km oder mH/m.

$$X'_L = \omega \cdot L' \quad (20.4)$$

20.3 Kapazität

Freileitungen haben gegeneinander und gegenüber dem Erdboden unterschiedliche elektrische Potentiale. Durch die Spannung zwischen dem Leiter und der Erde entsteht eine Erdkapazität C_E . Mit Teilkapazitäten je Strang erhält man die Betriebskapazität C_b .

$$C_b = C_E + 3 \cdot C_g = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot l}{\ln \frac{a}{r_0}} \quad (20.5)$$

Die Kapazität wird genauso auf die Länge bezogen und heißt Kapazitätssbelag C' in F/km.

$$X_C = \frac{l}{\omega \cdot C'_b \cdot l} \quad (20.6)$$

Die Werte für Betriebskapazitäten sind im Allgemeinen beim Hersteller zu erfragen.

Es bedeuten:

- l Länge des Kabels oder der Leitung in m
- S Querschnitt des Kabels oder der Leitung in mm^2
- ρ spezifischer Widerstand
- κ Leitwert
- α Temperaturkoeffizient
- ϑ Endtemperatur
- X_L induktiver Widerstand
- C_E Erdkapazität
- C_b Betriebskapazität

Die Impedanzwerte sind im Allgemeinen beim Hersteller zu erfragen, oder wenn nichts anderes vorliegt, können die **Tabellen 20.1** und **20.2** verwendet werden [1].

Tabelle 20.1: Widerstandswerte bei 20°C für Cu-Kabel und Leitungen

Leiterquerschnitt S in mm ²	Kupfer			Aluminium		
	Resistanz	Reaktanz	Impedanz	Resistanz	Reaktanz	Impedanz
	<i>r</i> in Ω/km	<i>x</i> in Ω/km	<i>z</i> in Ω/km	<i>r</i> in Ω/km	<i>x</i> in Ω/km	<i>z</i> in Ω/km
4 × 1,5	12,1	0,114	12,1	-	-	-
4 × 2,5	7,28	0,110	7,28	-	-	-
4 × 4	4,56	0,106	4,56	-	-	-
4 × 6	3,03	0,100	3,03	-	-	-
4 × 10	1,83	0,095	1,832	-	-	-
4 × 16	1,15	0,0894	1,153	-	-	-
4 × 25	0,727	0,0878	0,7319	1,20	0,088	1,203
4 × 35	0,524	0,0851	0,530	0,876	0,086	0,880
4 × 50	0,387	0,0848	0,396	0,641	0,084	0,646
4 × 70	0,268	0,0824	0,280	0,443	0,082	0,450
4 × 95	0,193	0,082	0,209	0,320	0,082	0,330
4 × 120	0,153	0,0805	0,172	0,253	0,080	0,265
4 × 150	0,124	0,0805	0,147	0,206	0,080	0,220
4 × 185	0,0991	0,0803	0,127	0,164	0,080	0,182
4 × 240	0,0754	0,0799	0,109	0,125	0,079	0,147
4 × 300	0,0601	0,0798	0,999	0,100	0,079	0,127

Tabelle 20.2: Widerstandswerte bei 160°C für Cu-Kabel und Leitungen

Leiter- querschnitt S in mm ²	Kupfer			Aluminium		
	Resistanz	Reaktanz	Impedanz	Resistanz	Reaktanz	Impedanz
	<i>r</i> in Ω/km	<i>x</i> in Ω/km	<i>z</i> in Ω/km	<i>r</i> in Ω/km	<i>x</i> in Ω/km	<i>z</i> in Ω/km
4 × 1,5	18,876	0,114	18,876	-	-	-
4 × 2,5	11,356	0,110	11,356	-	-	-
4 × 4	7,113	0,106	7,113	-	-	-
4 × 6	4,726	0,100	4,727	-	-	-
4 × 10	2,824	0,0945	2,824	-	-	-
4 × 16	1,778	0,0895	1,780	-	-	-
4 × 25	1,126	0,0879	1,129	1,872	0,088	1,873
4 × 35	0,817	0,0851	0,821	1,366	0,086	1,368
4 × 50	0,603	0,0848	0,608	0,999	0,084	1,002
4 × 70	0,418	0,0819	0,426	0,691	0,082	0,695
4 × 95	0,301	0,0819	0,312	0,499	0,082	0,505
4 × 120	0,241	0,0804	0,254	0,394	0,080	0,402

21 Grundregeln der Kabeldimensionierung

Die wichtigste Aufgabe beim Planen ist die richtige Bemessung der Kabel- und Leitungsanlagen. Dabei muss man [1], [11], [40]:

1. die Bemessungsregeln von Kabeln und Leitungen verstehen,
2. die Einflussfaktoren wie Verlegeart, Umgebungstemperatur und Häufung beachten und dafür
3. die Querschnitte auswählen und
4. die Schutzeinrichtungen einsetzen.

In elektrischen Anlagen verlegte Leitungen und Kabel müssen den entsprechenden DIN-VDE-Vorschriften genügen. Die Kennzeichnung erfolgt über den VDE-Leitfaden oder bei Starkstromleitungen **”harmonisiert”** sowie über die Daten des Kabelherstellers (**Bild 21.1**).



Bild 21.1: Kabeltypen

Der Schutz von Kabeln und Leitungen ist im DIN VDE 0100 Teil 430 erklärt.

Einflussgrößen der Leitungsbemessung sind:

- Mechanische Festigkeit (Bauart und Verlegung der Leitung)
- Thermische Beanspruchung (Betrieb und Störfall)
- Spannungsfall (Leitungsquerschnitt und maximal zul. Leitungslänge)
- Leistungsverlust (Wirtschaftlichkeit)
- Abschaltbedingungen (Schutz)

21.1 Schutz von Kabeln und Leitungen

Für den Schutz von Kabeln und Leitungen müssen folgende Grundregeln beachtet werden:

- Überlastschutz:
Das Kabel muss für den max. möglichen Belastungsstrom I_B oder den Nennstrom I_n bzw. den Einstellwert der Überlastschutzeinrichtung dimensioniert werden.
- Kurzschlusschutz:
Das Kabel muss für die bei einem Kurzschluss entstehende Wärmebelastung unter Berücksichtigung der Kurzschlusschutzeinrichtung ausreichend dimensioniert sein.
- Schutz durch Abschaltung:
In TN-Netzen wird der Schutz gegen elektrischen Schlag bei indirektem Berühren durch Abschaltung realisiert. Der Querschnitt der Kabel ist dabei so zu wählen, dass die eingebaute Überstromschutzeinrichtung Fehler mit vernachlässigbarer Impedanz an beliebiger Stelle zwischen Aussenleiter und Schutzleiter bzw. PEN-Leiter oder den damit verbundenen Körpern automatisch in den vorgegebenen Zeiten abschaltet.
- Spannungsfall:
Bei der Bemessung der Kabel ist der für die Verbraucher maximal zulässige Spannungsfall zu berücksichtigen.

Die Vorgehensweise für die Bestimmung der Betriebsmittel und die Koordination eines Stromkreises kann so beschrieben werden wie:

1. Berechnung des dreipoligen Kurzschlussstroms am Anfang des Stromkreises I''_{k3} nach DIN EN 60909-0 [76]
2. Bestimmung des Bemessungsstroms der Schutzeinrichtung I_n oder des Einstellstroms I_e des Leistungsschalters

3. Bestimmung des Betriebsstroms I_B des Stromkreises über die Wirkleistung
4. Bestimmung des Leiterquerschnittes A
5. Überprüfung des Querschnittes auf Überlast- und Kurzschlusschutz nach DIN VDE 0100-430 mit Bemessungsregeln, Verlegeart, Reduktionsfaktoren, Häufung und Umgebungstemperaturen
6. Überprüfung der maximal zulässigen Leitungslänge nach DIN VDE 0100-520 Beiblatt 2
7. Überprüfung des Spannungsfalls nach DIN VDE 0100-520 oder nach DIN 18015
8. Überprüfung der Selektivität nach DIN VDE 0100-530, DIN VDE 0100-710, DIN VDE 0100-718
9. Erstprüfung nach DIN VDE 0100-600
10. Dokumentation der Anlage

21.2 Allgemeine Anforderungen

Kabel und Leitungen müssen mit Überstrom-Schutzeinrichtungen gegen zu hohe Erwärmung geschützt werden, die sowohl durch betriebsmäßige Überlast als auch bei vollkommenem Kurzschluss auftreten kann.

Überstrom-Schutzeinrichtungen sind:

1. Einrichtungen, die sowohl bei Überlast als auch bei Kurzschluss schützen.
Diese sind:
 - Leitungsschutzsicherungen
 - Leitungsschutzschalter
 - Leistungsschalter
 - Motorschutzschalter
2. Einrichtungen, die nur bei Überlast schützen
 - Nur mit Überlastauslöser versehenes Schütz
3. Einrichtungen, die nur bei Kurzschluss schützen
 - Teilbereichssicherungen zum Geräteschutz
 - Leistungsschalter nur mit Schnellauslösern

Die Zuordnung von Überstrom-Schutzeinrichtungen für Kabel und Leitungen muss nach folgenden Bedingungen erfolgen (DIN VDE 0100 Teil 430):

Die Überstrom-Schutzeinrichtung ist so zu wählen, dass ihr Bemessungsstrom I_n

oder Einstellstrom I_e bei Leistungsschaltern kleiner oder gleich der Strombelastbarkeit I_Z des Kabels oder der Leitung ist:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \quad (21.1)$$

Der große Prüfstrom I_2 darf das 1,45-Fache der Strombelastbarkeit des Kabels oder der Leitung nicht überschreiten:

$$I_2 \leq 1,45 I_Z \quad (21.2)$$

Es bedeuten:

I_B	Strom, für den der Stromkreis bemessen ist (Betriebsstrom)
I_n	Bemessungsstrom der Schutzeinrichtung
I_Z	zulässige Strombelastbarkeit der Kabel und Leitungen
I_2	großer Prüfstrom

Der Schutz vor Überlast kann bestimmt werden:

- nach Tabellen,
- durch Berechnung,
- aus der Strombelastbarkeit der Leitung oder des Kabels.

Kurzschlussströme müssen durch Überstrom-Schutzeinrichtungen (ÜSE) abgeschaltet werden, bevor die Grenztemperaturen von Leitungen und Kabeln erreicht werden. Die Berechnung der zulässigen Abschaltzeit bis 5 s kann folgendermaßen erfolgen:

$$t_{\text{zul.}} = \left(\frac{k S}{I''_{k1}} \right)^2 \quad (21.3)$$

Es muss immer gelten:

$$t_{\text{zul.}} < t_{\text{ab}} \quad (21.4)$$

Es bedeuten:

t_{ab}	Abschaltzeit der ÜSEs in s
$t_{zul.}$	zulässige Ausschaltzeit oder Kurzschlussdauer in s
I''_{k1}	Fehlerstrom (kleinster Kurzschlussstrom) in A
k	Faktor (unter Berücksichtigung von Widerstand, Temperaturkoeffizient und Wärmekapazität) vom Leitermaterial und den entsprechenden Anfangs- und Endtemperaturen $\frac{A\sqrt{s}}{mm^2}$
S	Leiterquerschnitt in mm^2

21.3 Überstromanwendungen

Auf eine Überlast-Schutzeinrichtung muss verzichtet werden, wenn die Unterbrechung des Stromkreises eine Gefahr darstellen würde z. B. für Erregerstromkreise von umlaufenden Maschinen, Speisestromkreisen von Hubmagneten oder Sekundärstromkreise von Stromwandler. Das Ausschaltvermögen muss mindestens dem größten Strom bei vollkommenem Kurzschluss am Einbauort entsprechen. Im Allgemeinen werden Schutzeinrichtungen zum Schutz bei Überlast am Anfang jedes Stromkreises sowie an allen Stellen eingebaut, an denen die Strombelastbarkeit gemindert wird. Die Ausschaltzeit darf nicht länger sein als die Zeit, in der der Kurzschlussstrom die Leiter auf die zulässige Kurzschluss temperatur erwärmt. Schutzeinrichtungen bei Kurzschluss dürfen in öffentlichen Verteilungsnetzen entfallen, die im Erdreich verlegt sind. Bedingt durch ihre Bauart bieten z. B. Klingeltrafos und Schweißtrafos eine Überstrombegrenzung. Überstrom-Schutzeinrichtungen zum Schutz von Drehstrommotoren müssen alle Außenleiter vom Netz trennen.

21.4 Technische Anschlussbedingungen

1. Koordination von Schutzeinrichtungen:

- Planer und Errichter der elektrischen Anlage müssen Selektivität zwischen den Überstrom-Schutzeinrichtungen in der Kundenanlage und derjenigen im Hauptstromversorgungssystem sowie der Hausanschluss Sicherungen berücksichtigen.
- In Hauptstromversorgungssystemen sind die Schutzeinrichtungen gemäß DIN VDE 0100-530 selektiv auszuführen.

2. Stromkreisverteiler:

Bei der Aufteilung von Stromkreisen ist die Zuordnung von Anschlussstellen für Verbrauchsgeräte zu einem Stromkreis so vorzunehmen, dass durch das automatische Abschalten der diesem Stromkreis zugeordneten Schutzeinrichtung (z. B. Leitungsschutzschalter, Fehlerstrom-Schutzschalter) im Fehlerfall oder bei notwendiger manueller Abschaltung nur ein Teil der Kundenanlage abgeschaltet wird. Hiermit wird die größtmögliche Verfügbarkeit der elektrischen Anlage für den Anschlussnutzer erreicht.

3. Der Überlastschutz:

Das Kabel muss bei Überlastschutz dimensioniert sein für:

- den größten Betriebsstrom der Verbraucher
- den Einstellwert der Überlastschutzeinrichtung
- den Nennstrom der Schutzeinrichtung

4. Abhängigkeiten für die Belastbarkeit von Kabel:

- Betriebsart Leiterquerschnitt
- Aufbau von Kabeln und Leitungen
- Verlegebedingungen
- Umgebungsbedingungen

5. Bestimmung der Strombelastbarkeit I_Z der Leiter

- Leiterwiderstand pro Längeneinheit Leitermaterial und Leiterquerschnitt
- maximale Temperaturbelastbarkeit der Leiterisolierung
- Umgebungstemperatur
- Verlegeart (Wärmeabgabe an die Umgebung)
- Anzahl belasteter Adern, Leiterhäufung (gegenseitige Beeinflussung mehrerer Leiter)

6. Bemessungsregeln

- Der Überlastschutz ist erfüllt, wenn die Nennstromregel erfüllt ist. I_2 ist der Auslösestrom (großer Prüfstrom), der eine Auslösung der ÜSE unter den in den Gerätebestimmungen festgelegten Bedingungen bewirkt. Er darf maximal 45% größer sein als die zulässige Strombelastbarkeit der Leitung oder er muss die ÜSE bei 1,45-fachem Strom spätestens nach 1h auslösen.
- Der Kurzschlusschutz
Die Kurzschlussströme müssen durch ÜSE sofort abgeschaltet werden, bevor sie eine für die Leiterisolierung, die Anschluss- und Verbindungsstellen sowie Umgebung der Kabel und Leitungen schädliche Erwärmung und mechanische Wirkungen hervorrufen können. Dabei werden nur vollkommene Kurzschlussströme in Betracht gezogen.

21.5 Anordnung der Schutz-Einrichtungen

Das Ausschaltvermögen der Schutzeinrichtung muss mindestens dem größten Strom bei vollkommenem Kurzschluss am Einbauort entsprechen. Dabei ist der dreipolige Kurzschlussstrom zu berücksichtigen. Der Kurzschlussschutz ist jeweils am Anfang eines Stromkreises zu realisieren, sowie an allen weiteren Stellen, an denen der geforderte Kurzschlussschutz durch vorgeschaltete Schutzeinrichtungen nicht mehr sichergestellt ist.

Die Ausschaltzeit ($t < 5\text{ s}$) der Schutzeinrichtung bei vollkommenem Kurzschluss an beliebiger Stelle des Stromkreises muss kleiner sein, als die Zeit in der dieser Strom die Leiter auf die zulässige Kurzschlussstemperatur erwärmt.

Die folgenden **Tabellen 21.3** bis **21.8** sind DIN VDE 0298 Teil 4 "Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen für feste Verlegung in Gebäuden und von flexiblen Leitungen" und DIN VDE 0276 Teil 1000 "Strombelastbarkeit, Allgemeines, Umrechnungsfaktoren" entnommen.

21.6 Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen

Tabelle 21.1: Belastbarkeit von Kabeln und Leitungen für feste Verlegung in und an Gebäuden für Verlegearten A1, A2, B1, B2 und C, Leiter aus Kupfer oder Aluminium, Betriebstemperatur am Leiter 70°C, Umgebungstemperatur 30°C, nach DIN VDE 0298:2003-08 [40]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Verlegeart (Referenz- verlegeart ¹⁾ nach Tabelle 2)	A1		A2		B1		B2		C		
	Verlegung in wärmegedämmten Wänden				Verlegung in Elektro- Installationsrohren				Verlegung auf einer Wand		
	Aderleitungen im Elektro- Installationsrohr in einer wärmegedämmten Wand		Mehrdrahtes Kabel oder mehrdrahtige ummantelte Installationsleitung in einem Elektro- Installationsrohr in einer wärmegedämmten Wand		Aderleitungen im Elektro- Installationsrohr auf einer Wand		Mehrdrahtes Kabel oder mehrdrahtige ummantelte Installations- leitung in einem Elektro- Installationsrohr auf einer Wand		Ein- oder mehrdrahtes Kabel oder ein- oder mehrdrahtige ummantelte Installations- leitung		
Anz. belastete Adern	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	
Nennquerschnitt, mm ²	Belastbarkeit A										
Kupfer	1,5	15,5 ²⁾	13,5	15,5 ²⁾	13,0	17,5	15,5	16,5	15,0	19,5	17,5
	2,5	19,5	18,0	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24
	4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32
	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	33,02 ³⁾
	6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41
	10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57
	10	—	—	—	—	—	—	—	47,17 ³⁾	—	59,43 ³⁾
	16	61	56	57	52	76	68	69	62	85	76
	25	80	73	75	68	101	89	90	80	112	96
	35	99	89	92	83	125	110	111	99	138	119
	50	119	108	110	99	151	134	133	118	168	144
	70	151	136	139	125	192	171	168	149	213	184
	95	182	164	167	150	232	207	201	179	258	223
	120	210	188	192	172	269	239	232	206	299	259
	150	240	216	219	196	—	—	—	—	344	299
	185	273	245	248	223	—	—	—	—	392	341
240	321	286	291	261	—	—	—	—	461	403	
300	367	328	334	298	—	—	—	—	530	464	
Aluminium	25	63	57	58	53	79	70	71	62	83	73
	35	77	70	71	65	97	86	86	77	103	90
	50	93	84	86	78	118	104	104	92	125	110
	70	118	107	108	98	150	133	131	116	160	140
	95	142	129	130	118	181	161	157	139	195	170
	120	164	149	150	135	210	186	181	160	226	197
	150	189	170	172	155	—	—	—	—	261	227
	185	215	194	195	176	—	—	—	—	298	259
	240	252	227	229	207	—	—	—	—	352	305
	300	289	261	263	237	—	—	—	—	406	351
Belastbarkeit aus HD 384.5.523 S2 Tabelle/Spalte	52-C1/2	52-C3/2	52-C1/3	52-C3/3	52-C1/4	52-C3/4	52-C1/5	52-C3/5	52-C1/6	52-C3/6	
1) Weitere Verlegearten siehe Tabelle 9.											
2) Siehe Anhang C.											
3) Gilt nicht für Verlegung auf einer Holzwand und nicht für die Anwendung von Umrechnungsfaktoren; siehe Anhang C.											
ANMERKUNG In den Spalten 5, 9 und 11 werden runde Leiter mit Querschnitten bis einschließlich 16 mm ² angenommen. Werte für größere Querschnitte beziehen sich auf Sektorleiter und können sicher auch für runde Leiter angewendet werden.											

1) Weitere Verlegearten siehe DIN VDE 0298-4 2,3) Siehe Anhang C in DIN VDE 0298-4

Tabelle 21.2: Belastbarkeit von Kabeln und Leitungen für feste Verlegung in und an Gebäuden für Verlegearten D, E, F und G, Leiter aus Kupfer oder Aluminium, Betriebstemperatur am Leiter 70°C, Umgebungstemperatur 30°C in Luft, 20°C im Erdboden nach DIN VDE 0298:2003-08 [40]

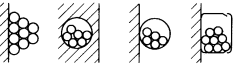
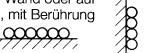
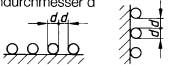
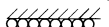
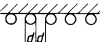
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Verlegeart (Referenzverlegeart ²⁾ nach Tabelle 2)	D ³⁾		E		F			G		
	Verlegung in Erde		Verlegung in Luft							
	Mehradriges Kabel im Elektro- Installationsrohr oder Kabelschacht im Erdboden	Mehradriges Kabel mit Abstand von mindestens 0,3 x Durchmesser D zur Wand	Einadrige Kabel mit Abstand von mindestens 1 x Durchmesser D zur Wand							
			mit Berührung			mit Abstand D				
										
Anz. belastete Adern	2	3	2	3	2	3				
Nennquerschnitt mm ²	Belastbarkeit A									
Kupfer	1,5	22	19	26	23	—	—	—	—	—
	2,5	29	25	36	32	—	—	—	—	—
	4	37	32	49	42	—	—	—	—	—
	6	47	39	63	54	—	—	—	—	—
	10	62	53	86	75	—	—	—	—	—
	16	81	69	115	100	—	—	—	—	—
	25	103	89	149	127	161	141	135	182	161
	35	124	107	185	158	200	176	169	226	201
	50	147	126	225	192	242	216	207	275	246
	70	181	156	289	246	310	279	268	353	318
	95	214	187	352	298	377	342	328	430	389
	120	244	213	410	346	437	400	383	500	454
	150	275	240	473	399	504	464	444	577	527
	185	309	271	542	456	575	533	510	661	605
	240	356	312	641	538	679	634	607	781	719
	300	403	349	741	621	783	736	703	902	833
400	—	—	—	—	940	868	823	1085	1008	
500	—	—	—	—	1083	998	946	1253	1169	
630	—	—	—	—	1254	1151	1088	1454	1362	
Aluminium	25	79	69	108	97	121	107	103	138	122
	35	95	83	135	120	150	135	129	172	153
	50	112	97	164	146	184	165	159	210	188
	70	139	120	211	187	237	215	206	271	244
	95	164	143	257	227	289	264	253	332	300
	120	187	164	300	263	337	308	296	387	351
	150	212	184	346	304	389	358	343	448	408
	185	237	210	397	347	447	413	395	515	470
	240	274	244	470	409	530	492	471	611	561
	300	309	278	543	471	613	571	547	708	652
	—	—	—	—	—	740	694	663	856	792
	—	—	—	—	—	856	806	770	991	921
	—	—	—	—	—	996	942	899	1154	1077
	Belastbarkeit aus HD 384.5.523 S2 Tabelle/Spalte	52-C2/7 ³⁾	52-C4/7 ³⁾	52-C11/2 52-C12/2	52-C11/3 52-C12/3	52-C11/4 52-C12/4	52-C11/6 52-C12/6	52-C11/5 52-C12/5	52-C11/7 52-C12/7	52-C11/8 52-C12/8

1,2,3) Siehe DIN VDE 0298-4

Tabelle 21.3: Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen mit Kupferleiter und PVC-Isolierung bei fester Verlegung in Gebäuden, Dauerbetrieb, Betriebstemperatur 70°C, Umgebungstemperatur 25°C sowie Zuordnung des Bemessungsstroms von ÜSE zum Schutz bei Überlast mit großem Prüfstrom nach DIN VDE 0298:2003-08 [40] (^{3,4} : $I_n \leq I_z$)

Verlegeart	A1		A2		B1		B2		C		E		
Anzahl der gleichzeitig belasteten Adern	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	
Nennquerschnitt in mm ²	Strombelastbarkeit I _Z in A ⁴⁾ Nennstrom I _n in A ³⁾												
1,5	I _Z	16,5	14,5	16,5	14,0	18,5	16,5	17,5	16,0	21	18,5	23	19,5
	I _n	16	13	16	13	16	16	16	16	20	16	20	16
2,5	I _Z	21	19	19,5	18,5	25	22	24	21	29	25	32	27
	I _n	20	16	16	16	25	20	20	20	25	25	32	25
4	I _Z	28	25	27	24	34	30	32	29	38	34	42	36
	I _n	25	25	25	20	32	25	32	25	35	35	40	35
6	I _Z	36	33	34	31	43	38	40	36	49	43	54	46
	I _n	35	32	32	25	40	35	40	35	40	40	50	40
10	I _Z	49	45	46	41	60	53	55	49	67	60	74	64
	I _n	40	40	40	40	50	50	50	40	63	50	63	63
16	I _Z	65	59	60	55	81	72	73	66	90	81	100	85
	I _n	63	50	50	50	80	63	63	63	80	80	100	80
25	I _Z	85	77	80	72	107	94	95	85	119	102	126	107
	I _n	80	63	80	63	100	80	80	80	100	100	125	100
35	I _Z	105	94	98	88	133	117	118	105	146	126	157	134
	I _n	100	80	80	80	125	100	100	100	125	125	125	125
50	I _Z	126	114	117	105	160	142	141	125	178	153	191	162
	I _n	125	100	100	100	160	125	125	125	160	125	160	160

Tabelle 21.4: Umrechnungsfaktoren für Häufung auf der Wand, im Rohr und Kanal, auf dem Fußboden und unter der Decke nach DIN VDE 0298:2003-08 [40]

Verlegeanordnung	Anzahl der mehradrigen Kabel oder Leitungen oder Anzahl der Wechsel- oder Drehstromkreise aus einadrigen Kabeln oder Leitungen (2 bzw. 3 stromführende Leiter)															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	
Gebündelt direkt auf der Wand, auf dem Fußboden, im Elektro-Installationsrohr oder -kanal, auf oder in der Wand 	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,48	0,45	0,43	0,41	0,39	0,38	
Einlagig auf der Wand oder auf dem Fußboden, mit Berührung 	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	
Einlagig auf der Wand oder auf dem Fußboden, mit Zwischenraum gleich dem Außendurchmesser d 	1,00	0,94	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
Einlagig unter der Decke, mit Berührung 	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	
Einlagig unter der Decke, mit Zwischenraum gleich dem Außendurchmesser d 	0,95	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	

○ Symbol für ein einadriges oder ein mehradriges Kabel oder eine einadrige oder eine mehradrige Leitung

Anmerkung: Die Umrechnungsfaktoren sind anzuwenden für die Ermittlung der Strombelastbarkeit gleichartiger und gleich hoch belasteter Kabel und Leitungen bei Häufung in derselben Verlegeart. Die Leiterquerschnitte dürfen sich dabei höchstens um eine Querschnittsstufe unterscheiden.

Die Umrechnungsfaktoren beziehen sich auf den Dauerbetrieb mit einem Belastungsgrad von 100 % für alle aktiven Leiter (Nennlast). Ist die Belastung kleiner als 100 %, können die Umrechnungsfaktoren höher sein.

Wenn der horizontale lichte Abstand zwischen benachbarten Kabeln und Leitungen das Zweifache ihres Außendurchmessers überschreitet, brauchen die Umrechnungsfaktoren nicht angewendet zu werden.

Tabelle 21.6: Umrechnungsfaktoren für abweichende Umgebungstemperaturen nach DIN VDE 0298:2003-08

zulässige Betriebs-temperatur	40°C	60°C	70°C	80°C	85°C	90°C
Umgebungs-temperatur in °C	Umrechnungsfaktoren					
10	1,73	1,29	1,22	1,18	1,17	1,15
15	1,58	1,22	1,17	1,14	1,13	1,12
20	1,41	1,15	1,12	1,10	1,09	1,08
25	1,22	1,08	1,06	1,05	1,04	1,04
30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
35	0,71	0,91	0,94	0,95	0,95	0,96
40	-	0,82	0,87	0,89	0,90	0,91
45	-	0,71	0,79	0,84	0,85	0,87
50	-	0,58	0,71	0,77	-	0,82
55	-	0,41	0,61	0,71	-	0,76
60	-	—	0,50	0,63	-	0,71
65	-	—	0,35	0,55	-	0,65
70	-	—	—	0,45	-	0,58
75	-	—	-	0,32	-	0,50
80	-	—	—	-	-	0,41
85	-	—	—	-	-	0,29

Tabelle 21.7: Belastbarkeit, Verlegung in Erde, Kabel mit $U_0/U = 0,6/1$ kV, DIN VDE 0276 Teil 603:2005-01

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Isolierwerkstoff	PVC									
Zulässige Betriebstemperatur	70 °C									
Bauartkurzzeichen	NYY			NYYWY		NAPP			NAPPWY	
Anordnung										
Anzahl der belasteten Adern	1	3	3	3	3	1	3	3	3	3
Querschnitt in mm ²	Kupferleiter Bemessungsstrom in A					Aluminiumleiter Bemessungsstrom in A				
1,5	41	27	30	27	31	–	–	–	–	–
2,5	55	36	39	36	40	–	–	–	–	–
4	71	47	50	47	51	–	–	–	–	–
6	90	59	62	59	63	–	–	–	–	–
10	124	79	83	79	84	–	–	–	–	–
16	160	102	107	102	108	–	–	–	–	–
25	208	133	138	133	139	160	102	106	103	108
35	250	159	164	160	166	193	123	127	123	129
50	296	188	195	190	196	230	144	151	145	153
70	365	232	238	234	238	283	179	185	180	187
95	438	280	286	280	281	340	215	222	216	223
120	501	318	325	319	315	389	245	253	246	252
150	563	359	365	357	347	436	275	284	276	280
185	639	406	413	402	385	496	313	322	313	314
240	746	473	479	463	432	578	364	375	362	358
300	848	535	541	518	473	656	419	425	415	397
400	975	613	614	579	521	756	484	487	474	441
500	1125	687	693	624	574	873	553	558	528	489
630	1304	–	777	–	636	1011	–	635	–	539
800	1507	–	859	–	–	1166	–	716	–	–
1000	1715	–	936	–	–	1332	–	796	–	–

1) Bemessungsstrom in Gleichstromanlagen mit weit entferntem Rückleiter

21.7 DIN VDE 0100-520 Beiblatt 2

Das Beiblatt 2 gibt Informationen über

- die Ermittlung der Strombelastbarkeit.
- den Schutz von Kabeln und Leitungen bei Überlast.
- die Ermittlung der maximal zulässigen Kabel- und Leitungslängen, bei denen
 1. der zulässige Spannungsfall und
 2. die automatische Abschaltung der Stromversorgung zum Schutz gegen elektrischen Schlagsichergestellt sind.

Die Zuordnung von Überstrom-Schutzeinrichtungen zum Schutz bei Überlast von Kabeln und Leitungen ist in DIN VDE 0100-520 **Tabelle 1** gezeigt. Maximal zulässige Leitungslängen bei 400 V und 3 % Spannungsfall werden in DIN VDE 0100-520 **Tabelle 2** gezeigt. Bei 230 V muss der Wert mit 0,5 multipliziert werden. Die maximal zulässigen Leitungslängen bei Einhaltung der Abschaltbedingungen im TN-System zeigt **Tabelle 2** in DIN VDE 0100-520. Die Impedanz vor der Überstrom-Schutzeinrichtung beträgt 300 mΩ. **Bild 21.2** zeigt ein Beispiel mit drei verschiedenen Stromkreisen, die in der Praxis vorkommen können. Bei der Berechnung wird der Betriebsstrom und nicht der Bemessungsstrom der Schutzeinrichtung als Parameter verwendet.

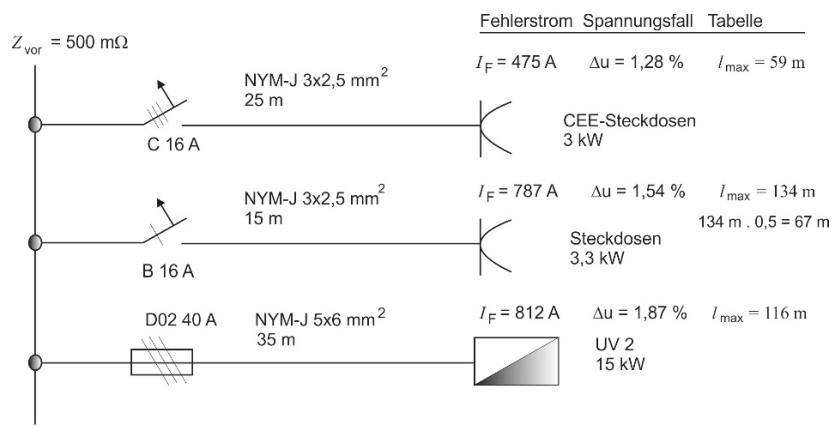


Bild 21.2: Bestimmung der maximal zulässigen Leitungslänge

21.8 Kabeldimensionierung

Im Normalfall wird die elektrische Energie in der Praxis meistens über ein Erdkabel mit einem vorgeschalteten Netz(öffentliches Netz) bis 300 kW oder über einen Verteilungstransformatoren über 300 kW geliefert. Die Impedanzen (Ohmschen und induktiven Widerstände) müssen für die Kurzschlussberechnung bekannt sein. Sie können entweder mit Formeln berechnet oder in Abhängigkeit vom Leiterquerschnitt nach Tabellen abgelesen werden. Mit dem Schaltschema soll ein Beispiel gezeigt werden (**Bild 21.3**).

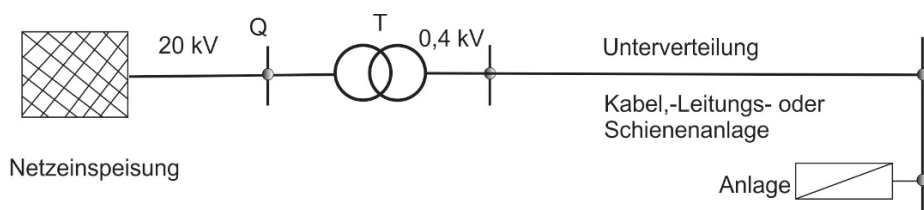


Bild 21.3: Impedanzberechnungen

Beispiel:

Eine Anlage wird mit einem Erdkabel vom Typ NYY-J 4 x 185 mm² versorgt. Die Kabellänge beträgt 410 m. Der Spannungsfall darf 5% (20 V) nicht überschreiten. Bestimmen Sie die maximal mögliche übertragbare Scheinleistung am Ende des Kabels.

Lösung:

Der Leistungsfaktor wird mit 0,8 angenommen. Wir berechnen zuerst den Strom für das Kabel mit den Impedanzen aus **Tabelle 20.1** aus.

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot l \cdot (R_L \cdot \cos\varphi + X_L \cdot \sin\varphi)$$

$$I = \frac{\Delta U}{\sqrt{3} \cdot l \cdot (R_L \cdot \cos\varphi + X_L \cdot \sin\varphi)}$$

$$I = \frac{20\text{V}}{\sqrt{3} \cdot 410\text{m} \cdot (0,0991\text{m}\Omega/\text{m} \cdot 0,8 + 0,0803\text{m}\Omega/\text{m} \cdot 0,6)} = 221\text{ A}$$

Die Scheinleistung beträgt:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 400\text{ V} \cdot 221\text{ A} = 153,11\text{ kVA}$$

Beispiel:

Ein Drehstrommotor hat einen Bemessungsstrom von 11,3 A. Bestimmen Sie den Leitungsquerschnitt bei Verlegung in Elektroinstallationsrohren B1. Die Umgebungstemperatur beträgt 50°C.

Lösung:

Nach **Tabelle 21.3** beträgt die Strombelastbarkeit 16,5 A, Querschnitt der Leitung 1,5 mm² und Bemessungsstrom der Schutzeinrichtung 16 A. Der Umrechnungsfaktor für 50°C ist nach **Tabelle 21.6** 0,71. Damit kann die neue Strombelastbarkeit ermittelt werden.

$$I_Z = I_r \cdot f = 16,5 \text{ A} \cdot 0,71 = 11,71 \text{ A}$$

In diesem Fall kann die Bemessungsregel nach der **Formel 21.2** nicht mehr eingehalten werden. Der Querschnitt muss auf 2,5 mm² erhöht werden.

Beispiel:

In dem gleichen Rohr sind noch fünf weitere Leitungen verlegt. Für die Häufung muss ein Umrechnungsfaktor von 0,57 nach **Tabelle 21.4** berücksichtigt werden. Dadurch wird die Strombelastbarkeit der neu ausgewählten 2,5 mm²-Leitung auf

$$I_Z = I_r \cdot f = 21 \text{ A} \cdot 0,57 = 11,97 \text{ A}$$

reduziert. Die Bemessungsregel gilt auch nicht mehr. Der Querschnitt muss auf 4 mm² mit der Strombelastbarkeit von 28 A erhöht werden.

Wenn man am Anfang der Berechnung beide Einflussfaktoren berücksichtigen sollte, dann würde man einen Querschnitt von 6 mm² herausbekommen.

Beispiel:

Ein Drehstrommotor hat einen Bemessungsstrom von 135 A. Die Zuleitung als Kabeltyp NYY wird in Erde verlegt. Bestimmen Sie den Kabelquerschnitt. Die Berechnung erfolgt bei 20°C.

Lösung:

Nach **Tabelle 21.7** beträgt die Strombelastbarkeit 159 A und der Querschnitt des Kabels 35 mm². Mit einer Verlegung in Luft würde man nach **Tabelle 21.8** einen Querschnitt von 50 mm² auswählen.

21.9 Funktionserhalt von Kabeln und Leitungen im Brandfall

Die wichtigsten Abschnitte der MLAR (Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie) über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen werden hier kurz erwähnt [41], [42], [44], [75].

21.9.1 Grundlegende Anforderungen

Bei der Durchführung der Maßnahmen zum Funktionserhalt sind auch evtl. Brände der elektrischen Leitungsanlagen für die allgemeine Stromversorgung zu berücksichtigen. Es ist daher z. B. nicht zulässig, die Leitungen der Stromversorgung für die Sicherheitseinrichtungen gemeinsam mit Leitungen der allgemeinen Stromversorgung in Schächten oder Kanälen der Funktionserhaltsklasse E30 bzw. E90 nach DIN 4102 Teil 12 zu verlegen oder Verteiler der Stromversorgung für die Sicherheitseinrichtungen gemeinsam mit Verteilern der allgemeinen Stromversorgung in Räumen nach Abschnitt 5.1.2, erster Spiegelstrich ohne ergänzende Brandschutzmaßnahmen unterzubringen. Die elektrischen Leitungsanlagen für bauordnungsrechtlich vorgeschriebene sicherheitstechnische Anlagen und Einrichtungen müssen so beschaffen oder durch Bauteile abgetrennt sein, dass die sicherheitstechnischen Anlagen und Einrichtungen im Brandfall ausreichend lang funktionsfähig bleiben (Funktionserhalt).

21.9.2 Funktionserhalt der Leitungen

Der Funktionserhalt der Leitungen ist gewährleistet, wenn die Leitungen

- Die Prüfanforderungen der DIN 4102-12:1998-11 (Funktionserhaltsklasse E30 bis E90) erfüllen oder
- auf Rohdecken unterhalb des Fußbodenestrichs mit einer Dicke von mindestens 30mm oder
- im Erdreich verlegt werden.

21.9.3 Dauer des Funktionserhaltes

Die Dauer des Funktionserhaltes der Leitungsanlagen muss mindestens 90 Minuten betragen bei

- Wasserdruckerhöhungsanlagen zur Löschwasserversorgung

- maschinellen Rauchabzugsanlagen und Rauchschutz-Druckanlagen für notwendige Treppenräume in Hochhäusern sowie für Sonderbauten, für die solche Anlagen im Einzelfall verlangt werden; abweichend hiervon genügt für Leitungsanlagen, die innerhalb dieser Treppenräume verlegt sind, eine Dauer von 30 Minuten,
- Bettenaufzügen in Krankenhäusern und anderen baulichen Anlagen mit entsprechender Zweckbestimmung und Feuerwehraufzügen; ausgenommen sind Leitungsanlagen, die sich innerhalb der Fahrschächte oder der Triebwerksräume befinden.

Die Dauer des Funktionserhaltes der Leitungsanlagen muss mindestens 30 Minuten betragen bei

- Sicherheitsbeleuchtungsanlagen; ausgenommen sind Leitungsanlagen, die der Stromversorgung der Sicherheitsbeleuchtung nur innerhalb eines Brandabschnittes, in einem Geschoss oder nur innerhalb eines Treppenraumes dienen; die Grundfläche je Brandabschnitt darf höchstens 1.600 m² betragen,
- Personenaufzügen mit Brandfallsteuerung; ausgenommen sind Leitungsanlagen, die sich innerhalb der Fahrschächte oder der Triebwerksräume befinden,
- Brandmeldeanlagen einschließlich der zugehörigen Übertragungsanlagen; ausgenommen sind Leitungsanlagen in Räumen, die durch automatische Brandmelder überwacht werden, sowie Leitungsanlagen in Räumen ohne automatische Brandmelder, wenn bei Kurzschluss oder Leitungsunterbrechung durch Brandeinwirkung in diesen Räumen alle an diese Leitungsanlage angeschlossenen Brandmelder funktionsfähig bleiben.

21.10 Kabelschottung

Abschottungen sind feuerwiderstandsfähige Bauteile zum Verschließen von Leitungsdurchführungen (z.B. elektrische Kabel, Rohre, Lüftungskanäle), Bauteilfugen und Durchbrüchen in brandabschnittsbildenden Bauteilen.

Dadurch soll das Übergreifen des Feuers und die Ausbreitung des Rauches von Abschnitt zu Abschnitt verhindert werden. Die Kennzeichnung der Kabelschottung muss mit einem dauerhaften Hinweis erkennbarer sein.

Die Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie (MLAR) ist als technische Baubestimmung in das geltende Baurecht der Länder eingeführt. Diese Richtlinie legt die Brandschutz-Anforderungen an Installationen in Gebäuden fest. Sie gilt für Leitungsanlagen von Elektro, Sanitär und Heizung, aber nicht für Lüftungsanlagen.

Die MLAR wird bei Installationen in Rettungswegen, beim Führen von Leitungen

durch raumabschließende Wände und Decken sowie bei Anlagen mit elektrischem Funktionserhalt im Brandfall verwendet.

Bild 21.4 zeigt Systemlösungen für Kabel und Rohre.

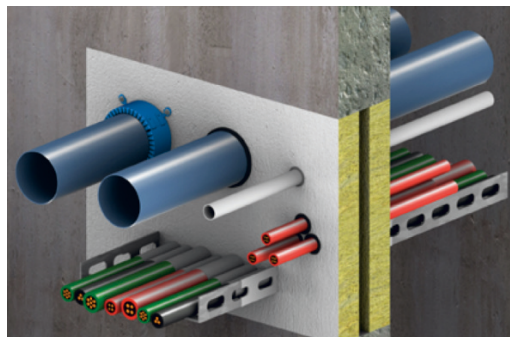


Bild 21.4: Systemlösungen für Kabel und Rohre [107]

21.11 Kabeltragsysteme

Kabeltragsysteme setzen sich aus mehreren Systemeinheiten zusammen. Im Folgenden sollen diese aufgezeigt werden. Bei der Planung ist es wichtig, das Gesamtsystem zu berücksichtigen. Beispielsweise sollten bei einem auf Brandschutz ausgelegten System keine normalen Dübel zur Befestigung verwendet werden, da solche im Brandfall sofort schmelzen. Die komplette Anlage muss aufeinander abgestimmt werden. Im folgenden soll nun kurz verdeutlicht werden welche einzelnen Punkte bei der Planung eine wichtige Rolle spielen können.

21.12 Befestigungssysteme

Von Schwerlast-Kabelleitern über leichte Gitterrinnen-Systeme bis hin zu korrosionssicheren Edelstahl-Systemen, all diese Systeme müssen über Befestigungsmaterialien verschraubt bzw. gesichert werden. Diese breite Palette von Befestigungsmaterialien gibt es für nahezu alle Montageaufgaben: von Schrauben über die Schnellbefestigung bis zum Schwerlastanker. Zur Auswahl werden folgende Anforderungen berücksichtigt:

- keine besonderen Anforderungen (z.B. Kellerräume)
- ästhetische Anforderung
- Funktionserhalt

Bild 21.5 zeigt schematisch die Befestigungssysteme.

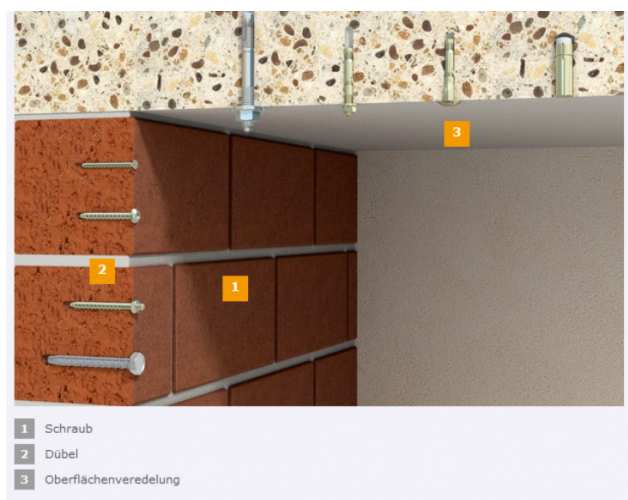


Bild 21.5: Kabeltragsysteme [45]

21.13 Montagesysteme

Die Montagesysteme bilden die solide Basis für leichte bis schwere Kabeltragsysteme. Vom Hängestiel bis zum Wandausleger muss eine sichere Befestigung an Decke, Wand und auf dem Boden gewährleistet werden.

Bild 21.6 zeigt schematisch die Montagesysteme.

21.14 Kabelrinnensysteme

Beim Verlegen zahlreicher Kabel werden Kabelrinnen oder Kabeltrassen verwendet. Sie werden häufig aus glasfaserverstärktem Polyester oder verzinktem Stahlblech gefertigt. Um ihr Eigengewicht zu verringern sind die Kabeltrassen gelocht. Die Lochung bringt neben einer Gewichtsverringerung zusätzlich den Vorteil einer besseren Lüftung zur Wärmeabfuhr. Es gibt aber auch Kabel aus Vollmaterial, diese aus ästhetischen oder hygienischen Gründen verwendet werden. Spielt die Hygiene in einem Bauprojekt eine große Rolle, so sollte man Vollmaterialkanäle verwenden, da diese leichter gereinigt werden können. Des Weiteren gibt es verschiedene Varianten, wie herkömmliche Systeme und Systeme, die höhere Anforderungen aushalten müssen, wie z. B. begehbare Kabelrinnen. Die Trassenbreiten

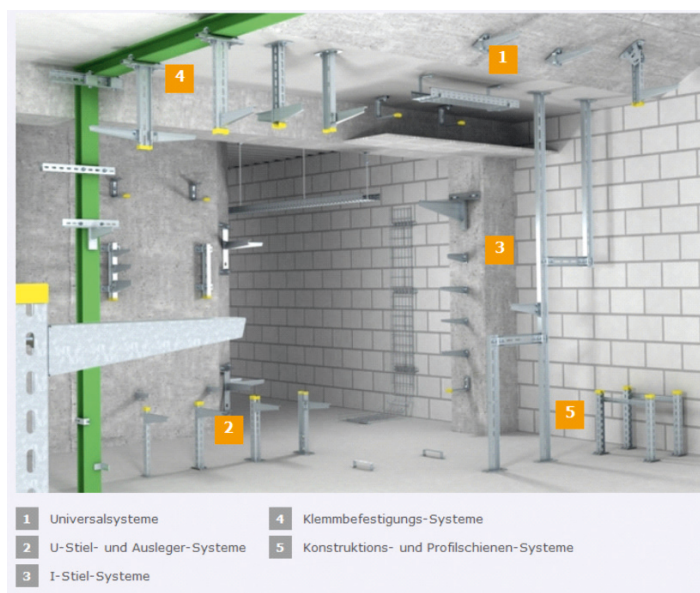


Bild 21.6: Montagesysteme [45]

werden in 100 mm, 150 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm, 500 mm und 600 mm gefertigt. Die einzelnen Trassen können verschiedene Seitenhöhen besitzen. Gängige Wangenhöhen sind 35 mm, 60 mm, 85 mm, 110 mm.

Bei der Verlegung können Fertigformteile wie Horizontal- Vertikalbögen, Kreuzungen, T-Abzweiger verwendet werden. Es sollte darauf geachtet werden, dass Kabelrinnen über allen anderen Gewerken wie z. B. Sanitär verläuft, um in einem Fehlerfall zum Beispiel Kurzschlüsse durch ausströmendes Wasser zu vermeiden.

Des Weiteren ist darauf zu achten, dass bei einem Richtungswechsel von z. B. 90° ein Niveauwechsel vorgenommen werden muss, um eine Kollision mit anderen Gewerken zu vermeiden. Außerdem muss bei einem Richtungswechsel auf die Biegeradien der Kabel geachtet werden. Biegeradien sind DIN VDE 0298 zu entnehmen und in der Planung zu berücksichtigen.

Bild 21.7 zeigt verschiedene Kabelrinnensysteme.

21.15 Überbelegung einer Kabeltrasse

Wichtig ist, dass die größte mögliche Trassenlast nicht überschritten werden sollte. Das Kabelführungssystem ist auf eine bestimmte Belastung je kg/m^2 ausgelegt. Wird diese durch Überbelegung überschritten, ist der Funktionserhalt im

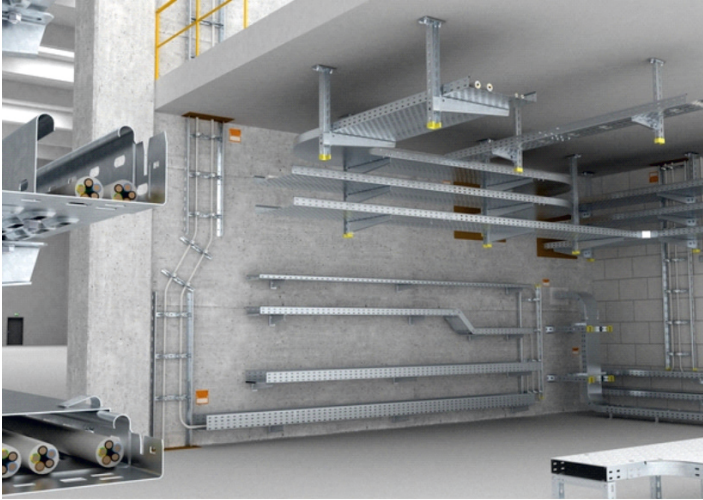


Bild 21.7: Kabelrinnensysteme [45]

Brandfall nicht mehr gewährleistet. Außerdem kann der beauftragte Elektriker ein Kabel aus einem kleineren Strang leichter nachziehen bzw. austauschen als bei einem überbelegten.

Da der Brandschutz immer gewährleistet sein muss, sollte die Überbelegung einer Kabeltrasse unbedingt vermieden werden, auch wenn die Trasse der mechanischen Belastung standhält.

Bild 21.8 zeigt eine überbelegte Kabeltrasse.

21.16 Brandschutz

Bei der Planung ist es wichtig, die einzelnen Brandabschnitte zu kennen. Brandschutzvorschriften müssen einhalten werden. Beim Durchqueren eines Brandabschnittes muss mit Brandschotts gearbeitet werden. Beim Einbau eines Brandschotts ist darauf zu achten, dass nur nach bauörtlicher Zulassung gearbeitet wird und dass der Elektriker eine Personenzulassung besitzt. Wie schon bei der Überbelegung von Kabeltrassen erwähnt, muss auf die Häufung von Kabelleitungen geachtet werden, da hier Übertemperaturen auftreten, welche die Kabel beschädigen und eine Brandursache sein können.

Bild 21.9 zeigt schematisch Brandursachen von Leitungen.

Ein weiteres Brandschutzsystem ist der Selbstbaukanal. Es gibt I- und E-Selbstbaukabelkanäle zur Ummantelung von Kabeltrassen und darauf gelagerten Elektro-



Bild 21.8: Überbelegung einer Kabeltrasse [45]



Bild 21.9: Brandschutz von Leitungen [45]

kabeln beliebiger Dicke und Materialien. Für alle brandschutzklassifizierten Bauteile und Brandabschnitte:

I: Installation Brandbeanspruchung von innen (für Flucht- und Rettungswege) und

E: Funktionserhalt Brandbeanspruchung von Außen.

21.17 Akustik

Beim Durchqueren einer Wand mit einer Trasse, werden akustische Schwingungen über die Trasse von einem in den anderen Raum übertragen. Bestehen Anforderungen an die Akustik bezüglich des Schallschutzes, so muss man diese Übertragung unterbinden. Hier kann man durch einfache Auftrennung der Trasse (mittels Flex) die akustische Übertragung verhindern.

22 Spannungsfall in elektrischen Anlagen

DIN 18015 Teil 1, DIN VDE 0100 Teil 520

Der Spannungsfall ist der Unterschied zwischen der Quellenspannung am Leitungsanfang und am Leitungsende, wo die Verbraucher angeschlossen werden. Der elektrischer Widerstand jeder Leitung verursacht beim Stromdurchgang einen Spannungsfall. Kabel und Leitungen sind daher so zu bemessen, dass der für Betriebsmittel zulässige Spannungsfall nicht überschritten wird. In **Bild 22.1** sind die Grenzen der Spannungsfälle nach DIN VDE 0100-520 und IEC 60364-5-52 schematisch dargestellt [60].

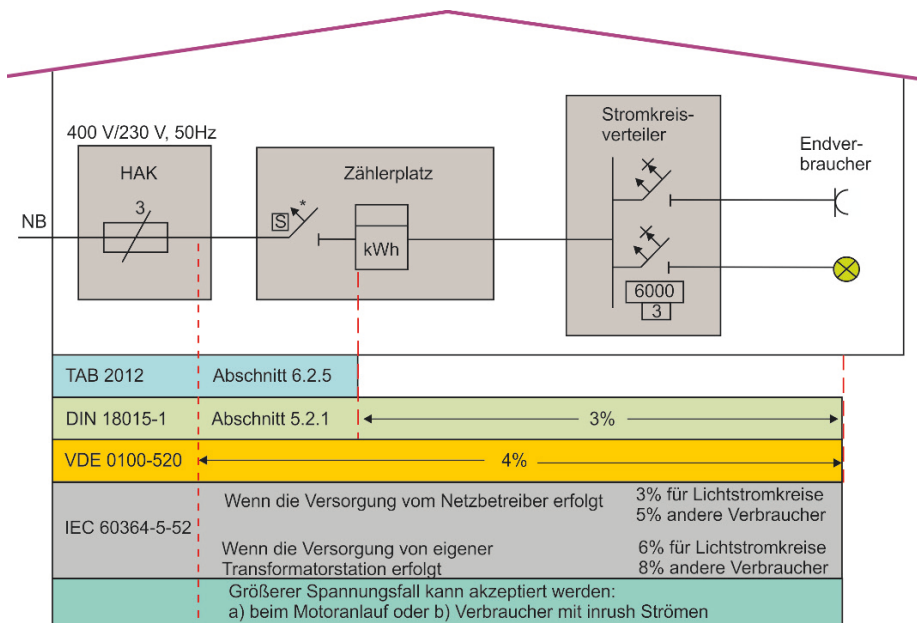


Bild 22.1: Spannungsfall in Gebäudeinstallationen [39]

Dabei sind zu beachten:

1. unterschiedliche Spannungsfallangaben,
2. Gleichstromnetze,
3. Wechselstromnetze,
4. Drehstromnetze und
5. allgemeine Schalt- und Netzkonzepte.

Zum zulässigen Spannungsfall werden in verschiedenen Vorschriften und Bestimmungen Angaben gemacht; z. B. für Niederspannungsnetze DIN VDE 0100 Teil 520 und DIN 18015-1. Der Spannungsfall zwischen dem Anfang der Verbraucheranlage und den zu versorgenden Betriebsmitteln soll nicht mehr als 4 % der Nennspannung des Netzes betragen. Unter normalen Netzbedingungen soll die Spannung an den Hausanschlüssen höchstens $\pm 10\%$ von der Nennspannung abweichen. Die Versorgungsnetzbetreiber (NB, damals EVU) stellen den Abnehmern elektrischer Energie eine Betriebsspannung zur Verfügung, die von der Nennspannung -10% und $+10\%$ abweichen darf. Innerhalb der Verbraucheranlage darf der Spannungsfall nur noch 4% betragen. Über die Höhe des zulässigen Spannungsfalls werden in verschiedenen Bestimmungen Angaben gemacht.

- DIN 18015 Teil 1 (hinter der Messeinrichtung $< 3\%$): Der Spannungsfall in der elektrischen Anlage hinter der Messeinrichtung bis zum Anschlusspunkt der Verbrauchsmittel soll 3% nicht überschreiten, dabei ist DIN VDE 0100 Teil 520 zu berücksichtigen.
- DIN VDE 0100 Teil 520 (von der Einspeisung bis zum letzten Verbraucher 4%): Der Spannungsfall soll zwischen der Hauseinführung (Hausanschlusskasten) und der Anschlussstelle der elektrischen Verbrauchsmittel nach DIN VDE 0100-520 (VDE 0100 Teil 520) insgesamt 4% und hinter der Messeinrichtung bis zur Anschlussstelle der elektrischen Verbrauchsmittel nach DIN 18015-1 insgesamt 3% der Nennspannung der Anlage nicht überschreiten.
- TAB 2012 (technische Anschlussbedingungen) AVBEltV (Verordnung über allgemeine Bedingungen für die Elektrizitätsversorgung von Tarifkunden des NB), Abschnitt 6.2.5.

22.1 Spannungsfall im Gleichstromnetz

Bei einem stromdurchflossenen Leiter fällt eine Spannung ab, die nach dem Ohmschen Gesetz berechnet werden kann. Bei der Berechnung wird die Leitung hin und zurück betrachtet (**Bild 22.2**).

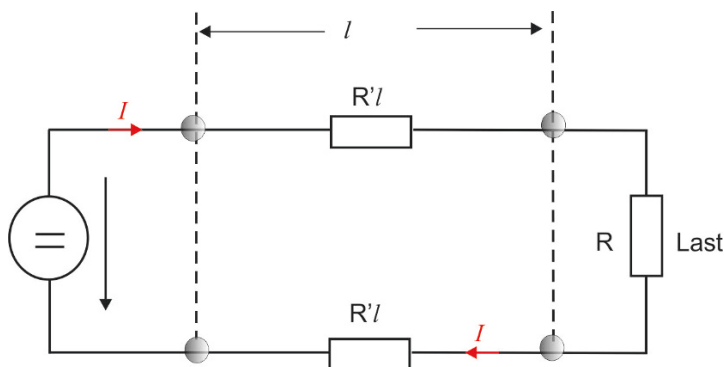


Bild 22.2: Ersatzschaltbild im Gleichstromnetz

Gleichstrom:**Spannungsfall:**

$$\Delta U = R \cdot I \quad (22.1)$$

Der Widerstand wird durch $R = \frac{2 \cdot l}{\kappa \cdot S}$ ersetzt. Man erhält:

$$\Delta U = \frac{2 l I}{\kappa S} \quad (22.2)$$

Beispiel: Klingelleitung

Durch eine 15 m lange Klingelleitung aus Kupfer fließt ein Gleichstrom von 0,5 A. Wie groß ist der Spannungsfall bei einem verlegten Querschnitt von 1,5 mm² und wie viel Prozent sind das bei einer Nennspannung von 24 V?

$$\Delta U = \frac{2 \cdot l \cdot I}{\kappa \cdot S} = \frac{2 \cdot 15 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ A}}{56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \cdot 1,5 \text{ mm}^2} = 0,178 \text{ V}$$

In Prozent:

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\% = \frac{0,178 \text{ V}}{24 \text{ V}} \cdot 100\% = 0,74 \%$$

22.2 Spannungsfall im Wechselstromnetz

Bei Hausinstallationen überwiegt der Ohmsche Widerstand der Leitung. Der Blindwiderstand ist bis 50 mm² zu vernachlässigen. Bei der Berechnung wird die zweifache Länge der Leitung hin und zurück berücksichtigt (**Bild 22.3**).

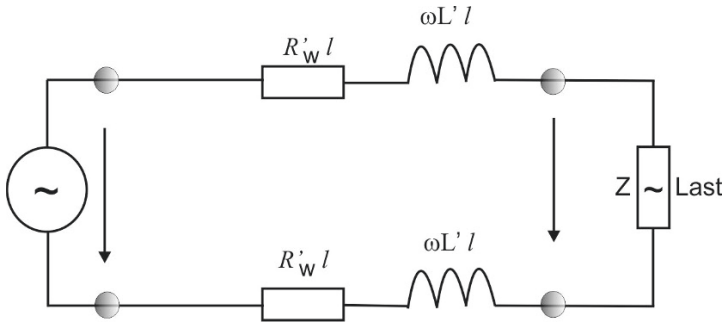


Bild 22.3: Ersatzschaltbild im Wechselstromnetz

Spannungsfall:

$$\Delta U = \frac{2 l I \cos \varphi}{\kappa S} \quad (22.3)$$

Leistung:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (22.4)$$

Querschnitt:

$$S = \frac{2 \cdot l \cdot I \cos \varphi}{u \cdot \kappa \cdot U_0} \quad (22.5)$$

Beispiel: Wechselstrom-Motor

Ein Wechselstrom-Motor mit einer Leistung von 400 W wird mit einer 25 m langen Leitung und einem Querschnitt von 2,5 mm² angeschlossen. Berechnen Sie den Motorbemessungsstrom und den Spannungsfall an den Klemmen des Motors bei einem Leistungsfaktor von 0,8. Wie groß ist der Spannungsfall?

Bemessungsstrom des Motors:

$$I_{rM} = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi} = \frac{400 \text{ W}}{230 \text{ V} \cdot 0,8} = 2,17 \text{ A}$$

$$\Delta U = \frac{2 \cdot l \cdot I \cos \varphi}{\kappa \cdot S} = \frac{2 \cdot 25 \text{ m} \cdot 2,17 \text{ A} \cdot 0,8}{56 \frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2} \cdot 2,5 \text{ mm}^2} = 0,62 \text{ V}$$

22.3 Spannungsfall im Drehstromnetz

Drehstromsysteme bestehen aus drei Einphasen-Systemen. Mit dem Rückleiter (Neutralleiter) benötigt man Vier-Leiter-Systeme. Bei einer symmetrischen Belastung der drei Außenleiter führt der Neutralleiter keinen Strom. Bei der Berechnung des Spannungsfalls ist eine einfache Leitungslänge erforderlich (**Bild 22.4**).

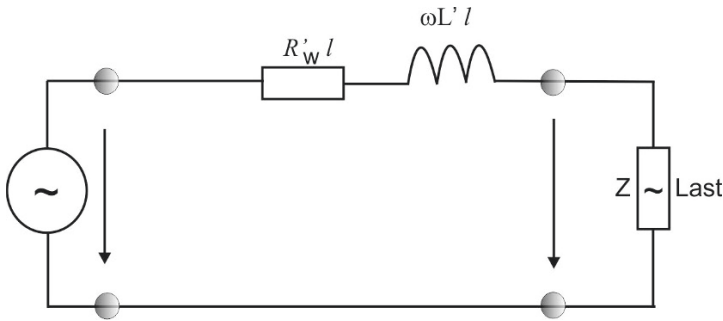


Bild 22.4: Ersatzschaltbild im Drehstromnetz

Spannungsfall:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} l I \cos \varphi}{\kappa S} \quad (22.6)$$

Leistung:

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi \quad (22.7)$$

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_n} 100\% \quad (22.8)$$

Querschnitt:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I \cdot \cos \varphi}{u \cdot \kappa \cdot U_n} \quad (22.9)$$

Mit der Leistung:

$$\Delta U = \frac{P_w l (R' \cos \varphi + X' \sin \varphi)}{U_n \cos \varphi} \quad (22.10)$$

Beispiel: Drehstromsystem

45 kW Drehstrommotor wird über eine 35 m lange Kunststoffmantelleitung NYM an ein 400 V/230 V, 50 Hz-Netz angeschlossen. Der Motor hat einen Wirkungsgrad von 92% und Leistungsfaktor von 0,85. Der Spannungsfall darf 5% nicht überschreiten. Berechnen Sie den erforderlichen Leitungsquerschnitt.

$$S = \frac{P_{\text{zu}} \cdot l}{\kappa \cdot \Delta U \cdot U_{\text{n}}} = \frac{48,91 \text{ kW} \cdot 35 \text{ m}}{56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \cdot 20 \text{ V} \cdot 400 \text{ V}} = 3,82 \text{ mm}^2$$

Gewählter Querschnitt: 4 mm².

23 Erdungsanlagen

Erdungsanlagen in elektrischen Installationen haben die Aufgabe, den Fehlerstrom in die Erde abzuleiten. Die Fehler (Kurzschluss oder Erdschluss) werden abgeschaltet und durch Überwachungsgeräte angezeigt. In diesem Kapitel wird beschrieben

1. die Wichtigkeit der Erdung,
2. der Unterschied zwischen Erdung und Potentialausgleich,
3. die Vor- und Nachteile der Erdungarten und
4. die Erdung der Quelle und der Verbraucher.

Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel, Erdungsanlagen, Schutzleiter, Schutzpotentialausgleichsleiter sind in DIN VDE 0100 Teil 540 und in DIN 18014 beschrieben [39], [62], [98]. In TN- und TT-Systemen wird der Fehler abgeschaltet und in IT-Systemen gemeldet. Die Erdung der Blitzschutzanlage hat die Aufgabe, den Blitz in die Erde abzuleiten. **Bild 23.1** zeigt Erdungssysteme mit wichtigen Begriffen.

23.1 Begriffe

1. Betriebserdung: Aus betrieblichen Gründen wird ein Punkt des Betriebsstromkreises geerdet. Ein Betriebserder ist ein Erder, der Betriebszwecken dient. Er verbindet die elektrische Anlage elektrisch mit dem Erdreich. Der Anlagenerder ist als Schutzerder zu betrachten. Ein Schutzerder dient im Wesentlichen dem Schutz gegen das Auftreten zu hoher Berührungsspannungen. Er übernimmt dabei die Funktion als Betriebs- und Schutzerder. Im Fehlerfall fließt im TN-System ein Teilbetrag, im TT-System fließt der gesamte Fehlerstrom über das Erdreich zum Sternpunkt des Stromerzeugers zurück.
2. Schutzerdung (Erdung über den Schutzleiter): Als Schutz gegen zu hohe Berührungsspannung wird ein Teil der Körper geerdet. Eine Erdungsanlage ist eine örtlich abgegrenzte Gesamtheit miteinander leitend verbundener Erder und

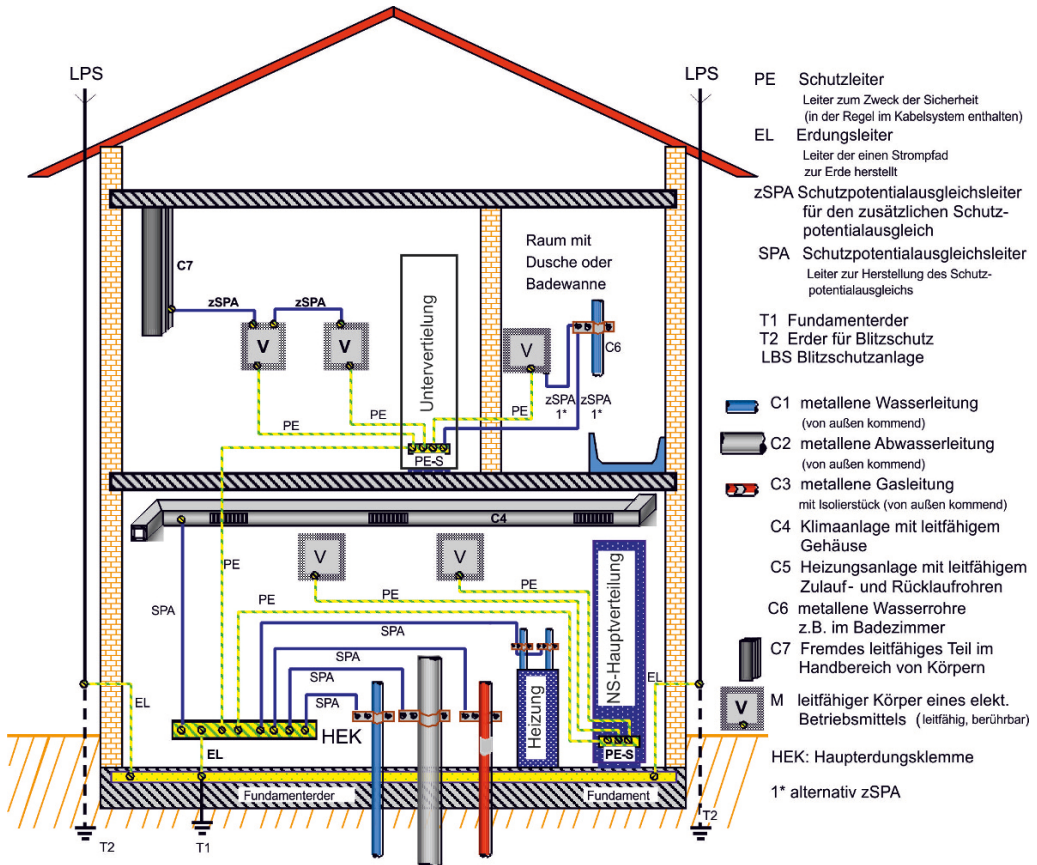


Bild 23.1: Erdungssystem und Begriffe [39]

Erdungsleiter. Nach DIN VDE 0100-540 heißt Erdung, einen elektrisch leitfähigen Teil über eine Erdungsanlage mit der Erde zu verbinden. Erdung ist die Gesamtheit aller Mittel und Massnahmen zum Erden. Erder sind leitfähige Teile, die einen guten Kontakt mit Erde haben und mit dieser eine elektrische Verbindung bilden.

3. Gesamterdungswiderstand: Widerstand zwischen der Haupterdungsklemme/-schiene und der Erde.
4. Erder: Erder sind Leiter, die in das Erdreich eingebettet sind und mit ihm in leitender Verbindung stehen. Die Erdungsleitung setzt sich aus dem Widerstand der Erdungsleitung und dem Erdausbreitungswiderstand zusammen. Als Leiterwerkstoff verwendet man meist Feuerverzinkten Bandstahl mit einem Mindestquerschnitt von 100 mm^2 , Kupferband mit 50 mm^2 oder Kupferseil mit 35 mm^2 .

Eine Erdungsanlage besteht aus einem oder mehreren miteinander leitend ver-

bundenen Erdern und der Erdungsleitung, die oberirdisch oder isoliert in Erde ein zu erdendes Anlagenteil mit dem Erder verbindet. Das Wasserrohrnetz darf nicht mehr als Erder benutzt werden. Erder müssen so verlegt werden, dass das Austrocknen oder Gefrieren des Bodens den Erdungswiderstand nicht über den erforderlichen Wert erhöht.

-Die Werkstoffe müssen so gewählt werden, dass sie den Korrosionseinflüssen widerstehen.

-Metallene Wasserrohrnetze dürfen als Erder nur verwendet werden, wenn die Zustimmung des Betreibers vorliegt und gewährleistet ist, dass die Leitungen nicht ausgebaut werden.

5. Schutzpotentialausgleich (Haupterdungsschiene):

Es müssen dafür:

- der Erdungsleiter,
- der Schutzleiter,
- der Hauptpotentialausgleichsleiter und
- der Erdungsleiter für Funktionserdung

miteinander verbunden werden.

6. PEN-Leiter: In TN-Systemen darf bei einem Leiterquerschnitt von mindestens 10 mm^2 Cu oder 16 mm^2 Al ein einzelner Leiter als Schutzleiter und Neutralleiter verwendet werden. Der PEN Leiter ist eine Kombination aus dem Neutral- und Schutzleiter, führt beide Funktionen. Hinter der Aufteilung des PEN-Leiters (meistens im HAK oder im Hauptverteiler) in Schutzleiter und Neutralleiter dürfen diese nicht mehr miteinander verbunden werden.

7. Leiter für den Hauptpotentialausgleich: Die Querschnitte müssen mindestens halb so groß wie der Querschnitt des größten Schutzleiters der Anlage sein, jedoch mindestens 6 mm^2 und bei Kupfer nicht größer als 25 mm^2 .

23.2 Erdungsarten

Für Blitzschutzanlagen sowie für die Schutzmaßnahmen bei indirektem Berühren in TN-, TT- und IT-Netzen sind Erdungsanlagen erforderlich. Entsprechend ihrem Zweck müssen bestimmte Grenzen des Ausbreitungswiderstandes über längere Zeit eingehalten werden. Angeschlossene metallene Rohrsysteme, wie z. B. Wasserleitungen, dürfen nicht die Funktion des Erders übernehmen.

Die Erdungsanlage muss auch ohne angeschlossene Rohrsysteme ihre Funktion erfüllen. **Bild 23.2** zeigt die wichtigsten Erdungsarten. Erder können einzeln oder gemeinsam errichtet werden. Falls der geforderte Erdungswiderstand nicht erreicht wird, müssen andere Maßnahmen vorgesehen werden.

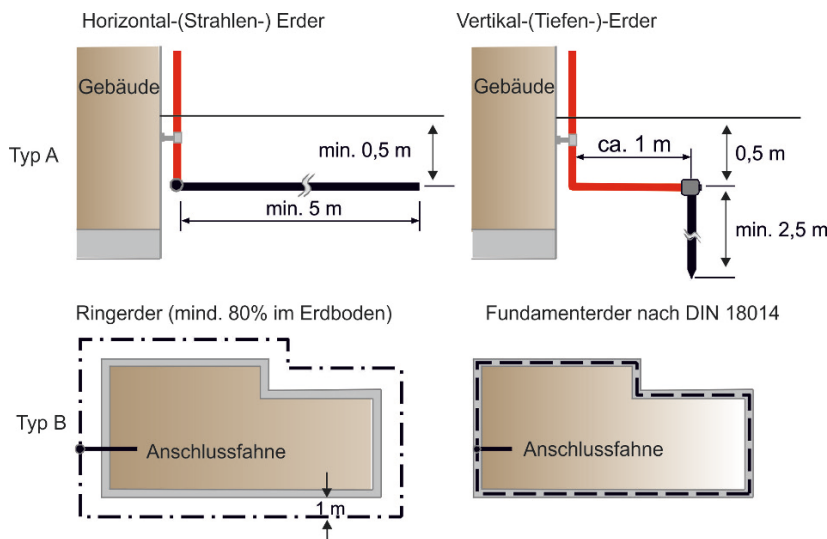


Bild 23.2: Erderanordnungen nach DIN EN 62305-3(VDE 0185-305-3):2006-10

Zu unterscheiden sind folgende Erderarten:

1. Ringerder:

Der Ringerder wird oft als Blitzschutzerder verwendet (**Bild 23.3**). Er umschließt in der Regel in etwa einem Meter Abstand das zu schützende Gebäude, wenn z. B. im Altbau ein Fundamenteerder fehlt. Der Ringerder eignet sich besonders zur Potentialsteuerung, d.h. Verringerung der Schrittspannung an der Erdoberfläche.

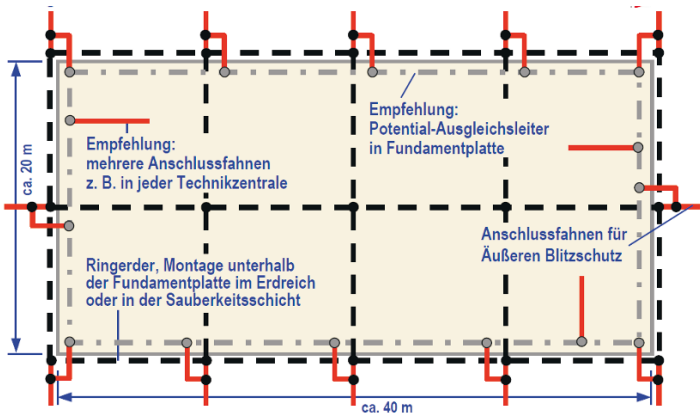


Bild 23.3: Ringerder nach DIN 18014 Maschenweite max. (10 x 10) m bei geschlossenen Wannen

Genaue Berechnungsformel:

$$R_A = \frac{\rho_E}{\pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{2\pi \cdot D}{d} \quad (23.1)$$

Näherungsformel:

$$R_A \approx \frac{2 \cdot \rho_E}{3 \cdot D} \quad (23.2)$$

Mit

$$D = 1,13 \cdot \sqrt{A}$$

2. Banderder:

Er ist bei der Kabelverlegung gebräuchlich, da der Kabelgraben den Erder mit aufnehmen kann.

$$R_A = \frac{\rho_E}{\pi \cdot L} \cdot \ln \frac{2 \cdot L}{d} \quad (23.3)$$

3. Strahlenerder:

Es werden bis zu 6 Banderder strahlenförmig um einen Punkt verlegt. Man bekommt auf diese Weise auf der Erdoberfläche mit geringer Ausdehnung einen verhältnismäßig kleinen Ausbreitungswiderstand. Werden die äußeren Strahlen noch durch einen Ring verbunden, erhält man den so genannten Maschenerder. Der Winkel zwischen den einzelnen Strahlen soll größer als 60° sein [94].

Genaue Berechnungsformel:

$$R_A = \frac{\rho_E}{4 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \frac{L}{d} + 1,75 \quad (23.4)$$

Mit guter Annäherung $l > 10 \text{ m}$ gilt:

$$R_A \approx \frac{2 \cdot \rho_E}{l} \quad (23.5)$$

4. Tiefenerder:

Tiefenerder sind geeignet für Erdungen aller Art in allen Bodenarten, außer Fels (**Bild 23.4**). Der Widerstand ist abhängig von der Bodenart, deren Feuchtigkeit und Temperatur. Für Tiefenerder werden zusammensetzbare Erdstäbe in Längen von jeweils 1,5 m oder 2 m verwendet. Sie können sowohl senkrecht als auch schräg in den Boden eingetrieben werden. Die Gesamtlänge einer Tiefenerdung hängt von dem geforderten Erdungswiderstand ab.

Bei der Berechnung des Erdungswiderstandes muss die Gefrierzone von der Gesamtlänge des Erddrers abgezogen werden. Ein Erdungssystem besteht aus einer Tiefenerderspitze, mehrerer miteinander durch eine Kugelpressverbindung zusammengefügtten Erdungsstäben und einem Anschlussrundstück oder einer Anschlussschelle. Bohrung und Zapfen bilden eine Presspassung. Bei diesem Verbindungssystem wirkt die Flächenpressung auf die gesamte Umfangsfläche des Zapfens.

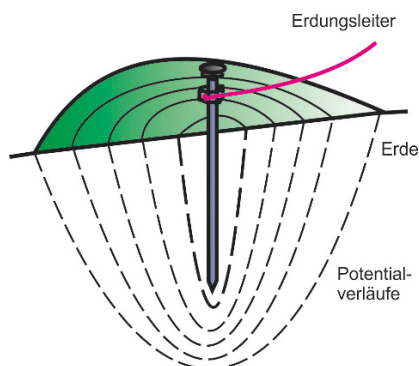


Bild 23.4: Tiefenerder

Genaue Berechnungsformel:

$$R_A = \frac{\rho_E}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot L} \cdot \ln \frac{4 \cdot L}{d} \quad (23.6)$$

Näherungsformel:

$$R_A \approx \frac{\rho_E}{l} \quad (23.7)$$

5. Fundamenterder (DIN 18014):

Alle metallisch leitenden Systeme in einem Haus können elektrische Spannungen verschleppen, und das führt zu gefährlichen Berührungsspannungen. Um dies zu vermeiden, wird in das Fundament der Außenwände ein Fundamenterder eingelegt, an dem alle metallisch leitenden Systeme angeschlossen werden (**Bild 23.5**).

Dadurch wird ein Potentialausgleich hergestellt. Als Material wird Bandstahl verwendet, der einen geschlossenen Ring im Fundament bilden muss. Für jeden Neubau ist ein Fundamenterder Pflicht. Neben der Sanitär- und Elektroinstallation wird auch die Antennen- Blitzschutz- und Fernmeldeanlage angeschlossen. In etwa 30 cm Höhe soll die Anschlussfahne im Hausanschlussraum herausgeführt werden und eine Länge von ca. 1,5 m haben. Oberhalb der Anschlussfahne ist die Haupterdungsschiene anzubringen.

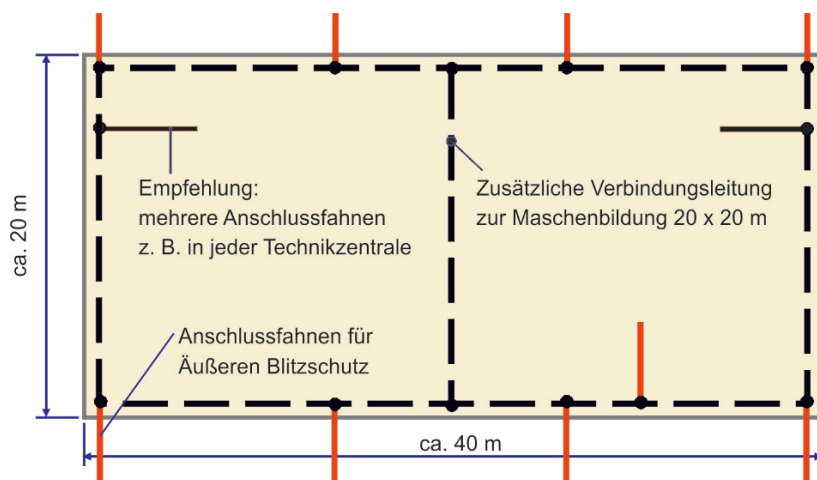


Bild 23.5: Fundamenterder nach DIN 18014 Maschenweite max. (20 x 20) m

$$R_A = \frac{2 \cdot \rho_E}{\pi \cdot D} \quad (23.8)$$

Mit

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot L \cdot B}{\pi}}$$

Es bedeuten:

- R_A Ausbreitungswiderstand in Ω ,
- ρ_E Spezifischer Erdwiderstand in Ωm ,
- l Länge des Erders in m,
- d Durchmesser eines Ringerders in Ωm ,
- r Radius des Tiefenerders in m,
- D Durchmesser der Ersatzkreisfläche in m,
- n Anzahl der parallel geschalteten Erder,
- A Fläche der umschlossenen Fläche eines Ring- oder Fundamenterders in m^2 .

In jedem Gebäude muss ein Hauptschutzpotentialausgleich (HPA) durchgeführt werden. An diesen HPA sind alle leitfähigen Teile anzuschliessen.

1. Fundamenterder
2. Schutzleiter
3. Leiter zum Blitzschutzerder
4. alle metallische Rohre

Änderungen beim Fundamenterder:

- Bei erhöhtem Erdübergangswiderstand ist ein Ringerder in korrosionsfestem Material außerhalb/unterhalb des Fundamenterders oder des Recyclingmaterials zu installieren. Maschenweite ist ≤ 20 m, bei Blitzschutz ≤ 10 m.
- Bei Verwendung eines Ringerders ist ein Potentialausgleichsleiter in das Fundament einzubringen, der alle 2 m mit der Bewehrung und alle 20 m Umfang bzw. je Ableitung des Blitzschutzes zu verbinden ist. Die Maschenweite $\leq$ von 20 m ist einzuhalten.
- Die Erdungsanlage muss gemessen und mit Zeichnungen und Fotografien dokumentiert werden. Der Durchgangswiderstand zwischen dem Anschlussteil für die HEK und allen anderen Anschlussteilen muss einen Widerstandwert von $\leq 0,2 \Omega$ betragen.

23.3 Bedeutung des Schutzpotentialausgleichs

Im Bereich der Elektrotechnik wird unter dem Begriff Potential eine Spannung zwischen einem Messpunkt und einem Bezugspunkt (z. B. Erde) verstanden. Potentialausgleich ist somit nichts anderes als Teile mit einem unterschiedlichen Potential auf ein gleiches oder annähernd gleiches Spannungsniveau zu bringen, indem man die Punkte unterschiedlicher Potentiale miteinander verbindet (**Bild 23.6**).

Ein Schutzpotentialausgleich nach DIN VDE 0100 Teil 200 ist eine elektrische Verbindung, die die Körper elektrischer Betriebsmittel und fremde leitfähige Teile auf gleiches oder annähernd gleiches Potential bringt. In der Praxis treten nach wie vor Unsicherheiten bei der Errichtung des Potentialausgleichs auf. Der Potentialausgleich und die Erdung sind sehr wichtige elektrische Schutzmaßnahmen.

Die Potentialausgleichsschiene ist die Verbindung zum Gebäudeerder (Fundamenterder) und stellt dieses Erdpotential als Basis der gesamten Hausinstallation zur Verfügung.

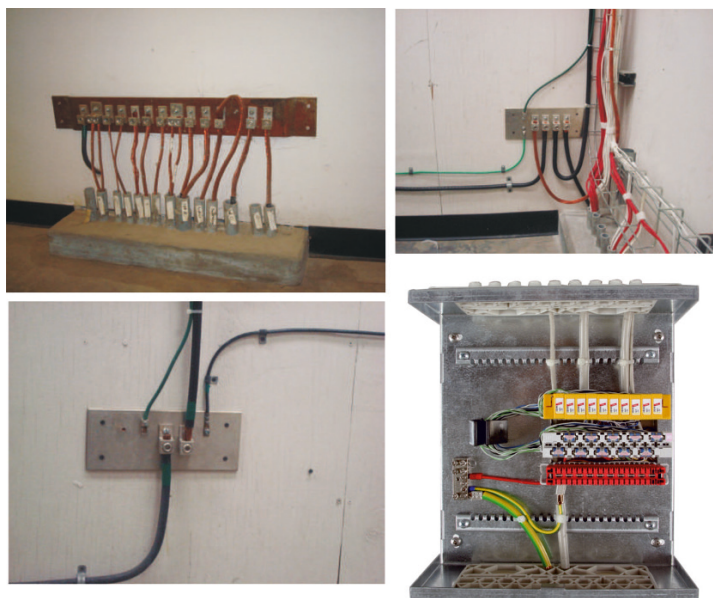


Bild 23.6: Bauformen des Schutzpotentialausgleiches

Der Hauptschutzpotentialausgleich ist eine wichtige Massnahme zum Schutz gegen elektrischen Schlag. Er wird in der Errichtungsbestimmung DIN VDE 0100 Teil 410 Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V, Schutzmaßnahmen für jedes Gebäude ausdrücklich gefordert und ist in jedem Fall unabhängig von den anderen Massnahmen zum Schutz gegen direktes und bei indirektem Berühren zu errichten.

Die vielfältigen Anforderungen hinsichtlich Erdung und Potentialausgleich werden nachfolgend nochmals kurz zusammengefasst:

- Verwenden eines TN-S-Systems oder eines netzförmigen Erdungskonzeptes.
- Ein zentraler Gebäudeeintritt für alle Rohrleitungen und Kabel. Räumliche Trennung der EMI-Quellen (elektro-magnetische Interferenz) von den Komponenten der Datenübertragung.
- Getrennte Erdungszonen für elektrische Maschinen (Pumpen, Motoren u.a.) und elektronische Geräte (LANs, Nebenstellenanlagen u.a.), die mit unterschiedlichen Erdungsleitungen verbunden werden.
- Einsatz geschirmter, symmetrischer Kabel. Räumlich getrennte Führung von Energie- und Datenkabeln.
- Vermeidung von Induktionsschleifen (Flächenantennen) durch reduzierte Flächen
- Potentialausgleich für metallische Gehäuse und Schirme.
- Der Potentialausgleich soll über eine möglichst kurze und impedanzarme Verbindung erfolgen.
- Bei der Verbindung von Gebäuden sind Potentialdifferenzen zu vermeiden.
- Das Gesamtkonzept hinsichtlich Schirmung und Potentialausgleich bei der Auswahl der Endgeräte und einzelnen Komponenten berücksichtigen.
- Anwenden des Zonenkonzeptes mit Grob- und Feinschutz.

23.4 Beispiele für Erdung

23.4.1 Beispiel: Erdung des Transformatorgebäudes

Für ein Transformatorgebäude wurde ein Ringerder und Strahlenerder verlegt (**Bild 23.7**). Folgende Daten sind bekannt: Spezifischer Erdwiderstand $\rho_E = 100 \Omega m$, Länge des Ringerders $l = 72 \text{ m}$, Durchmesser des Erders $d = 0,01 \text{ m}$, Länge des Strahlenerders $l = 100 \text{ m}$. Berechnen Sie den Gesamterdungswiderstand.

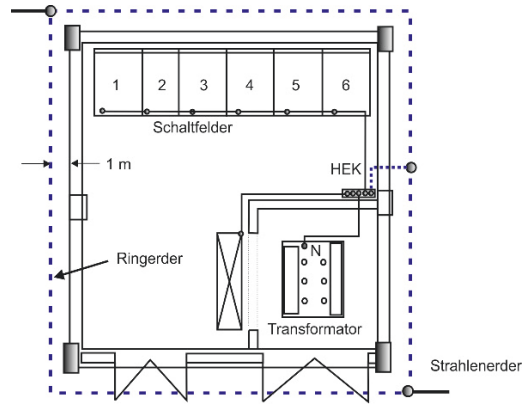


Bild 23.7: Ansicht des Transformatorgebäudes

Widerstand des Ringerders (R_R):

$$R_R = \frac{\rho_E}{\pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{2\pi \cdot D}{d}$$

$$D = \frac{L}{\pi} = \frac{72 \text{ m}}{\pi} = 23 \text{ m}$$

$$R_R = \frac{100 \Omega m}{\pi^2 \cdot 23 \text{ m}} \cdot \ln \frac{2\pi \cdot 23 \text{ m}}{0,01 \text{ m}} \approx 4,22 \Omega$$

Widerstand des Strahlenerders (R_S):

$$R_S = \frac{\rho_E}{\pi^2 \cdot L} \cdot \ln \frac{2\pi \cdot L}{d}$$

$$R_S = \frac{100 \Omega \text{m}}{\pi^2 \cdot 100 \text{ m}} \cdot \ln \frac{2\pi \cdot 100 \text{ m}}{0,01 \text{ m}} \approx 3 \Omega$$

Gesamtwiderstand beträgt:

$$R_G = \frac{R_R \cdot R_S}{R_R + R_S} = \frac{4,22 \Omega \cdot 3 \Omega}{4,22 \Omega + 3 \Omega} = 1,75 \Omega$$

23.4.2 Beispiel: Erdung eines Gebäudes

Für ein Gebäude (**Bild 23.8**) wurde Fundamenterder verlegt. Der spezifische Erdwiderstand wurde mit $\rho_E = 150 \Omega \text{m}$ gemessen. Berechnen Sie den Ausbreitungswiderstand des Erders.

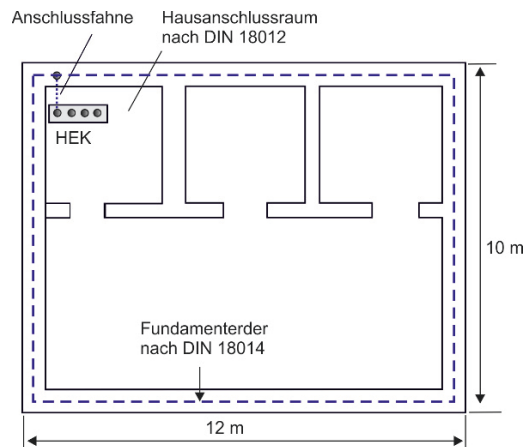


Bild 23.8: Fundamenterder, (HEK: Haupterdungsklemme)

Zuerst wird die Ersatzkreisfläche berechnet:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot b}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 12 \text{ m} \cdot 10 \text{ m}}{\pi}} = 12,36 \text{ m}$$

$$R_{FE} \approx \frac{2 \cdot \rho_E}{\pi \cdot D} \approx \frac{2 \cdot 150 \Omega \text{m}}{\pi \cdot 12,36 \text{ m}} = 7,73 \Omega$$

24 Blitzschutzanlagen

DIN EN 62305, (VDE 0185-305)

Für das Planen, Errichten, Erweitern, Überprüfen, Ändern und die Wartung von Blitzschutzsystemen für bauliche Anlagen gilt DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305). Diese Norm ist für die Auswahl von Schutzmaßnahmen für den Blitzschutz baulicher Anlagen ohne Begrenzung hinsichtlich deren Höhe und von Versorgungsnetzen anwendbar. In den Bauordnungen der Länder sind Angaben über die Blitzschutzbedürftigkeit baulicher Anlagen enthalten.

Blitzschutz ist notwendig für bauliche Anlagen, bei denen der Blitzschlag leicht eintreten und zu schweren Schäden führen kann. Diese Anlagen im Einzelnen sind z. B. Schulen, Kirchen, Wohnheime, Stadtverwaltungen, Krankenhäuser, Bahnhöfe, Fernmeldetürme, Banken, Flughäfen, Sportstätten, Museen, Explosionsgefährdete Bereiche, Kindergärten, Geschäftshäuser und Hochhäuser.

Für eine fachgerechte Planung einer Blitzschutzanlage ist die Gebäudebeschreibung von größter Wichtigkeit. In der Vorplanungsphase muss die anzuwendende Blitzschutzklasse auf der Basis der zugrunde liegenden Vorschriften mit dem Auftraggeber abgestimmt werden. Für die Installation und Ausführung der Anlage ist ein Montageplan und das Leistungsverzeichnis zu erstellen. Detaillierte Angaben zum Planen, Bauen und Prüfen sind dem Buch [93] zu entnehmen.

In diesem Kapitel werden die Blitzschutzanlagen, die Blitzschutzklassen, die Erdung, der Blitzschutz-Potentialausgleich und die Überspannungsableiter erklärt.

24.1 Begriffe und Definitionen

- Ausbreitungswiderstand:
Widerstand der Erde zwischen dem Erder und der Bezugs Erde.
- Bezugs Erde: Teil der Erde, insbesondere der Oberfläche außerhalb des Ein-

flussbereiches eines Erders bzw. einer Erdungsanlage, in welchem zwischen zwei beliebigen Punkten keine merklichen vom Erdungsstrom herrührenden Spannungen auftreten.

- Blitzschutzerdung:
Erdung zur Ableitung des Blitzstromes in die Erde.
- Erde:
das leitfähige Erdreich
- Spezifischer Erdwiderstand:
spezifischer elektrischer Widerstand der Erde in Ωm .
- Steuererder:
Erder, der nach Form und Anordnung zur Potentialsteuerung dient.
- Ableiter:
schützen elektrische Anlagen und Betriebsmittel vor Gefahren der Blitzeinschläge.
- Überspannungsableiter:
schützen einzelne Verbraucher oder Verbrauchergruppen vor Überspannungen.
- Blitzstromableiter:
schützen Niederspannungsanlagen vor Direkt- oder Naheinschlägen und leiten den Blitz über den Potentialausgleich in die Erde ab.
- Erdungsspannung:
Spannung zwischen einer Erdungsanlage und der Bezugserde auftretende Spannung.
- Berührungsspannung:
Teil der Erdungsspannung, der vom Menschen überbrückt werden kann.
- Schrittspannung:
ist der Teil der Erdungsspannung, der vom Menschen in einem Schritt von 1 m Länge überbrückt werden kann, wobei der Stromweg über den menschlichen Körper von Fuß zu Fuß verläuft.

DIN EN 62305 (VDE 0185-305) berücksichtigt neue technische Erkenntnisse und basiert auf dem heutigen Stand der Technik (**Bild 24.1**). Schutzbedürftige bauliche Anlagen:

Die Bauordnungen der Länder fordern Blitzschutzanlagen für schutzbedürftige bauliche Anlagen, z. B. Bay Bo Art. 15 (7). „Bauliche Anlagen, bei denen nach Lage, Bauart oder Nutzung Blitzeinschlag leicht eintreten oder zu schweren Folgen führen kann, sind mit dauernd wirksamen Blitzschutzanlagen zu versehen“.

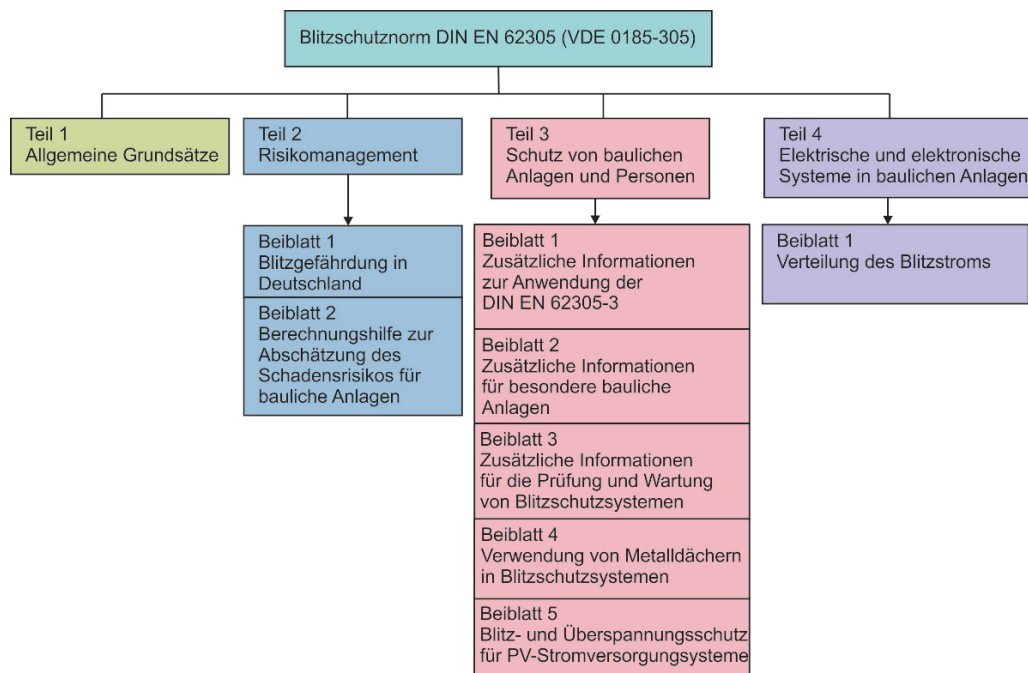


Bild 24.1: Blitzschutznormung

Dieser Artikel wird in der Regel auf folgende Gebäude angewendet:

- Kirchen, Sportstätten, Schulen, Museen
- Kindergärten, Krankenhäuser, Wohnheime, Sanitätshäuser
- Stadtverwaltung, Polizeistationen
- Gemeindeverwaltung, Feuerwehrrhäuser
- Banken, Justizvollzugsanstalten
- Sparkassen, Fernmeldetürme
- Autobahntankanlagen, Fernmeldeämter
- Bahnhöfe, Betriebsgebäude der Bahn
- Betriebsgebäude der Post, Betriebsgebäude der Flughäfen
- explosionsgefährdete und explosivstoffgefährdete Bereiche
- Kläranlagen bzw. wasserwirtschaftliche Anlagen

Sicherheitsstromversorgungsanlagen, elektrische Anlagen und Blitzschutzanlagen (§14) „Versammlungsstätten müssen Blitzschutzanlagen haben, die auch die sicherheitstechnischen Einrichtungen schützen (äußerer und innerer Blitzschutz)“.

einen größeren Abstand als 5m von einer Fangleitung hat. Die Höhe der Fangstange darf nicht größer sein als 2m, und der Abstand zum Gebäude muss mindestens 2m betragen. Das Gebäude gilt als geschützt, wenn der Winkel 45° beträgt. Die Dachaufbauten aus elektrisch nichtleitendem Material dürfen nicht höher sein als 0,3m. Ein Dachlüfter darf ohne Einbeziehen in das Blitzschutzkonzept nicht angeschlossen werden. Wenn der Dachlüfter mit einer Fangstange geschützt wird, dann ist der Abstand zwischen dem Dachlüfter und der Fangstange gemäß **Bild 24.5** zu ermitteln. Fangeinrichtungen sind vor allem an Ecken und Kanten anzubringen. Die Ableitung verbindet die Fangeinrichtung und die Erdungsanlage miteinander. Je 20m Umfang, gemessen an den Dachaußenkanten, soll eine Ableitung, ausgehend von den Ecken der baulichen Anlage, errichtet werden. Durch die Fangeinrichtung wird ein Schutzbereich mit einem Schutzwinkel von 45° gebildet. Ableitungen müssen Trennstellen erhalten, um spätere Messungen der Anlage zu ermöglichen. Die erforderliche Anzahl der Ableitungen für bauliche Anlagen kann man wie folgt berechnen (jedoch mindestens zwei Ableitungen müssen angeordnet werden): Ableitungen sind so anzubringen, dass

- mehrere parallele Strompfade bestehen,
- die Länge der Stromwege so kurz als möglich gehalten wird,
- Verbindungen zum Potentialausgleich hergestellt werden,
- keine Beeinflussung der Sicherheitsbereiche durch Ableitungen vorkommt,
- sie miteinander nahe der Erdoberfläche verbunden werden können.

2. inneren Blitzschutz:

Gegen die Auswirkungen des Blitzstromes und seiner elektrischen und magnetischen Felder muss man elektrische Installationen im Inneren der Gebäude schützen. Der Hauptbestandteil des inneren Blitzschutzes ist der Potentialausgleich, an den alle metallischen Rohre, starkstrom- und informationstechnischen Anlagen angeschlossen werden. Für die informationstechnischen Einrichtungen bietet das Blitzschutz-zonen-Konzept den besten Schutz. Die baulichen Anlagen werden in Blitzschutz-zonen eingeteilt und vom Außenbereich bis in die empfindlichsten Bereiche der Anlage zwischen den einzelnen Schnittstellen sind angepasste Schutzeinrichtungen und Geräte vorgesehen.

3. Überspannungsschutz:

Elektrische und elektronische Geräte müssen gegen Auswirkungen der Überspannungen geschützt werden. Diese Überspannungen entstehen durch die atmosphärische Entladungen, z. B. als Nah-, Direkt- oder Ferneinschläge in die NS-Anlagen und Schalthandlungen, z. B. Abschaltung der induktiven Lasten, Ein- und Abschalten von Leuchtstofflampen, Erd- und Kurzschlüsse, Auslösen von Sicherungen. Der Hauptschutz-Potentialausgleich muss nach DIN VDE 0100 Teil 540 in jedem Gebäude installiert werden. An die Haupterdungs-

schiene sind alle leitfähigen Teile, metallische Rohre, Energie- und Informationsanlagen, Gas-, Wasser- und Heizrohrleitungen, Metallteile der Gebäudekonstruktion, Erder, Blitzschutzanlagen leitend anzuschliessen. Die Forderung nach einem Blitzschutz-Potentialausgleich ist erfüllt, wenn alle Systeme, die in die bauliche Anlage eingeführt werden, über Blitzstrom-Ableiter nahe der Eintrittsstelle angeschlossen werden (**Bild 24.3**).

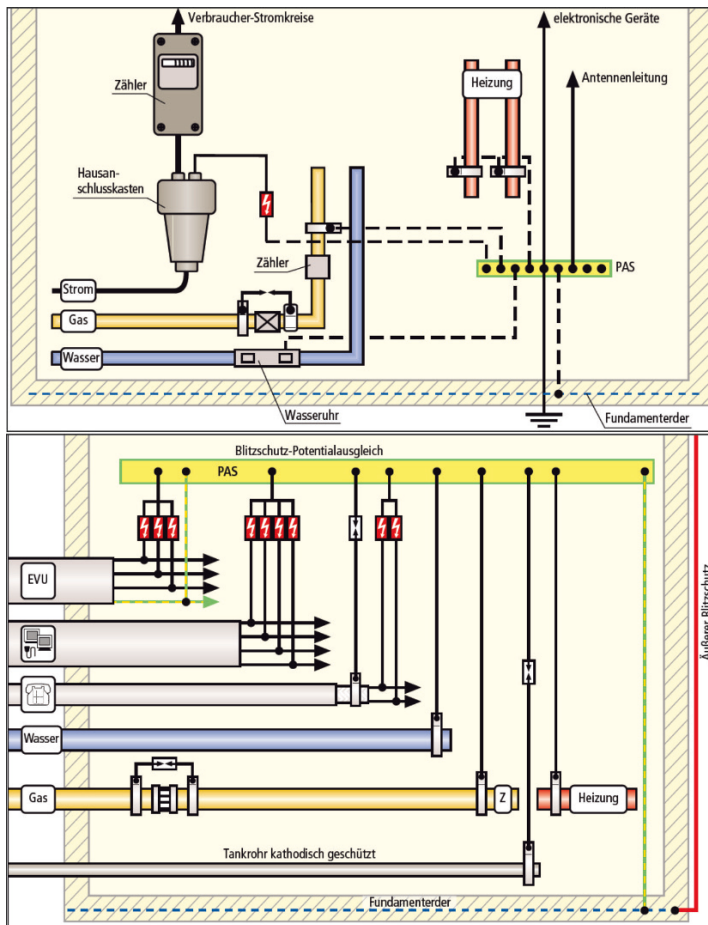


Bild 24.3: Ausführung des Blitzschutz-Potentialausgleichs nach DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3) auf der Basis des Hauptpotentialausgleichs nach DIN VDE 0100-410, -540 [94]

24.3 Blitzschutzklassen

Um eine Blitzschutzanlage planen zu können, muss man zuerst mit einer geeigneter Software Risikoanalyse durchführen und die Schutzklasse der zu planenden baulichen Anlage bestimmen. Den Blitzschutzklassen I bis IV sind unterschiedliche Werte des Wirkungsgrades der Blitzschutzanlage, der Maschenweite und des Blitzkugelradius zugeordnet (**Tabelle 24.1**).

Tabelle 24.1: Charakteristik der Blitzschutzklassen

Blitzschutzklasse	Kugelradius	Maschenweite	Wirkungsgrad
	m	m	%
I	20	5×5	98
II	30	10×10	95
III	45	15×15	90
IV	60	20×20	80

Für jede Schutzklasse kann man den Schutzwinkel eines Gebäudes abhängig von der Höhe der Fangeinrichtung über Erdboden feststellen (**Bild 24.4**).

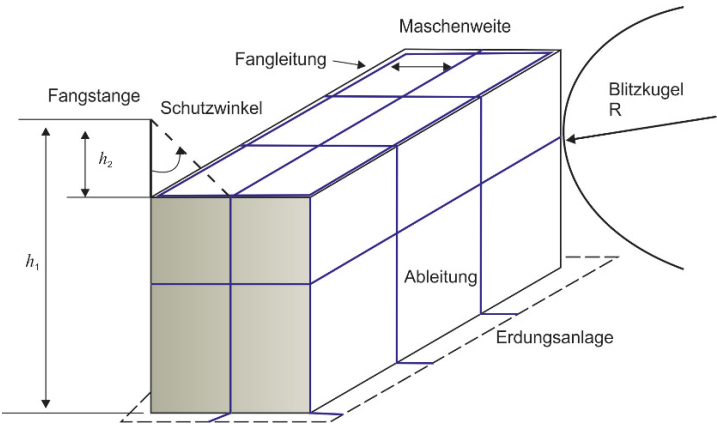


Bild 24.4: Schutzklassen

Bei der Festlegung der Lage der Fangeinrichtung werden allgemein drei Methoden angewandt:

1. Schutzwinkel-Methode (α) für einfache Formen
2. Blitzkugel-Methode (Radius r) für komplizierte Fälle
3. Maschen-Methode (w) für ebene Flächen.

Beispiele für Blitzschutzklassen (nach VdS 2010:2010-09):

SK I	Bio- und Nuklearanlagen, Gebäude für Explosionsgefahr,
SK II	Krankenhäuser, Fernmeldetürme, Dome, Industrieanlagen, Kirchen, Museen
SK III	Wohnhäuser, Höfe, Schulen, Theater, Banken, Bürogebäude, Heime, Kindergärten, Lager,
SK IV	Wetterschutzhütten, Fluchtunterstände

Die **Tabelle 24.2** zeigt Werkstoffe, Form und Mindestquerschnitte von Fangleitungen und Ableitungen nach DIN VDE 0185-3, Tab.7.

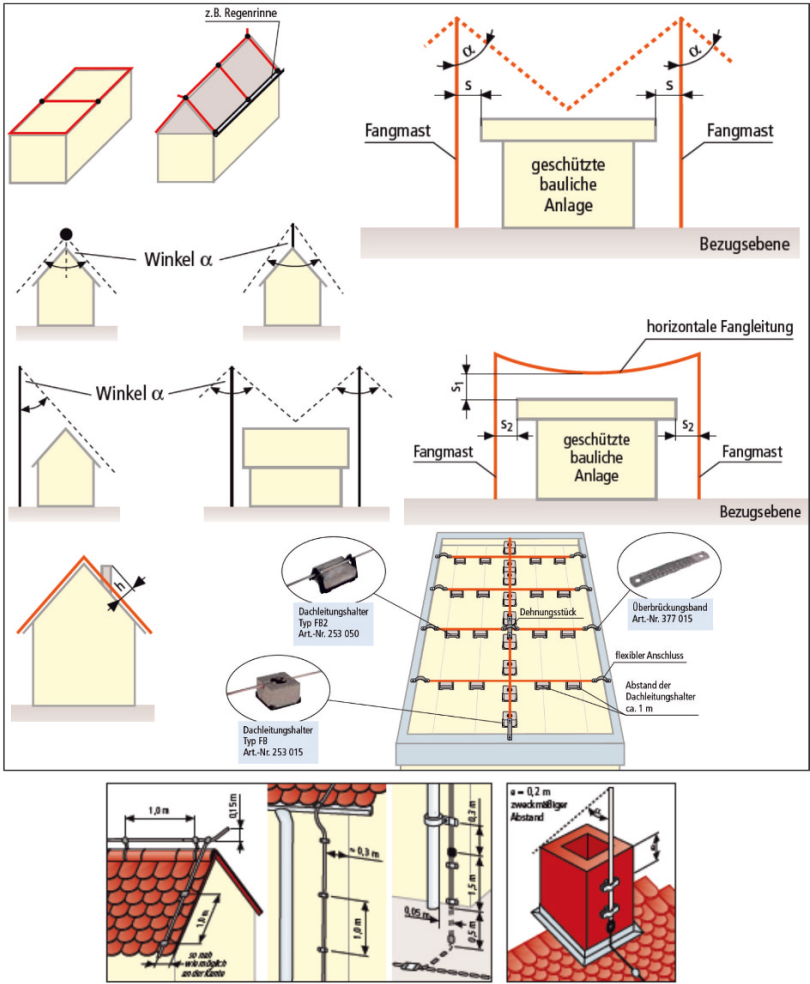


Bild 24.5: Beispiele von Fangeinrichtungen [94]

Tabelle 24.2: Mindestquerschnitte von Fangleitungen und Ableitungen

Werkstoff	Form	Mindest- querschnitt mm ²	Anmerkung Mindestmaß
Kupfer	Band	50	Dicke 2 mm
	Rund	50	ϕ 8 mm
	Seil	50	Einzeldraht ϕ 1,7 mm
	Rund ^{c,d}	200	ϕ 16 mm
Kupfer verzinnt ^a	Band	50	Dicke 2 mm
	Rund	50	ϕ 8 mm
	Seil	50	Einzeldraht ϕ 1,7 mm
Aluminium	Band	70	Dicke 2 mm
	Rund	50	ϕ 8 mm
	Seil	50	Einzeldraht ϕ 1,7 mm
Aluminium- legierung	Band	50	Dicke 2,5 mm
	Rund	50	ϕ 8 mm
	Seil	50	Einzeldraht ϕ 1,7 mm
	Rund ^d	200	ϕ 16 mm
Stahl feuerverzinkt ^b	Band	50	Dicke 2 mm
	Rund	50	ϕ 8 mm
	Seil	50	Einzeldraht ϕ 1,7 mm
	Rund ^{c,d}	200	ϕ 16 mm
Nicht rostender Stahl ^e	Band ^f	60	Dicke 2 mm
	Band	105	Dicke 3 mm
	Rund ^f	50	ϕ 8 mm
	Seil	70	Einzeldraht ϕ 1,7 mm
	Rund ^c	200	ϕ 16 mm
	Rund ^d	78	ϕ 16 mm

^a feuerverzinkt oder galvanisch verzinkt, Mittelwert 2 μ m,
^b Zinnüberzug 50 μ m,
^c nur für Fangstangen,
^d nur für Erdeinführungsstangen.
^e Chrom $\geq$ 16 %, Nickel $\geq$ 8 %, Kohlenstoff max $\geq$ 0,03 %,
^f bei nichtrostendem Stahl im Beton auf 78 mm² (Durchmesser 10 mm) und bei Flachmaterial auf 75 mm² (3 mm Dicke) erhöhen.

24.3.1 Erdungsanlage

Die Erdungsanlage kann man als Fundamenterder, Ringerder oder Einzelerder ausführen. Eine integrierte, gemeinsame Erdungsanlage von verschiedenen tech-

nischen Einrichtungen, wie z. B. Niederspannungsanlagen, Fernmeldeanlagen und Blitzschutz, ist zu planen und zu errichten. Die Erdungsanlage muss mit dem Potentialausgleich verbunden werden. Die Ableitungen sind an diese Erdungsanlage anzuschließen. Nach DIN VDE 0185 darf der Erdungswiderstand nicht mehr als 10Ω betragen. Man unterscheidet zwei Typen von Erdungsanlagen:

- Anordnung Typ A
 1. Oberflächenerder (Horizontalerder)
 2. Tiefenerder (Vertikalerder)
- Anordnung Typ B
 1. Ringerder
 2. Fundamenterder.

1. Anordnung Typ A: Oberflächenerder

Ein Oberflächenerder ist ein Erder, der im Allgemeinen in geringer Tiefe von mindestens 0,5 m und **je Ableitung** mit 5 m Länge eingebracht wird (**Bild 24.6**).

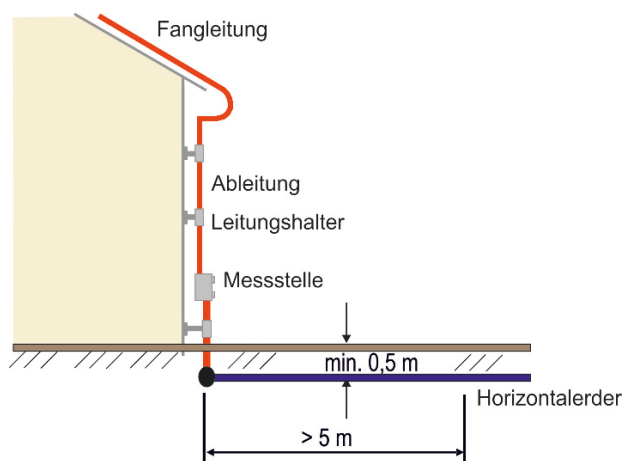


Bild 24.6: Oberflächenerder [94]

Er kann aus Rund- oder Flachleitern bestehen und als Ring-, Strahlen- oder Maschenerder oder als Kombination aus diesen ausgeführt sein.

2. Anordnung Typ A: Tiefenerder

Es ist nicht in allen Fällen möglich, Fundament- oder Ringerder als Blitzschutzender zu benutzen. DIN EN 62305 bietet in diesem Fall die Möglichkeit, **je Ableitung** einen Einzelerder zu verlegen. Als Einzelerder ist entweder ein Oberflächenerder mit 20 m Länge oder ein Tiefenerder (**Bild 24.7**) mit 9 m Länge in 1 m Abstand vom Fundament der Anlage senkrecht in die

Erde einzuführen. Tiefenerder haben den Vorteil, dass sie in größeren Tiefen in Erdschichten liegen, deren spezifischer Widerstand geringer ist als in oberflächennahen Bereichen. Bei senkrecht verlegten Erdern hat Frost keine negative Auswirkungen auf den Erdungswiderstand. Der Mindestabstand von Tiefenerdern untereinander sollte das 1,5fache der Länge sein. **Tiefenerder sind nur dann zulässig, wenn sie miteinander verbunden sind.**

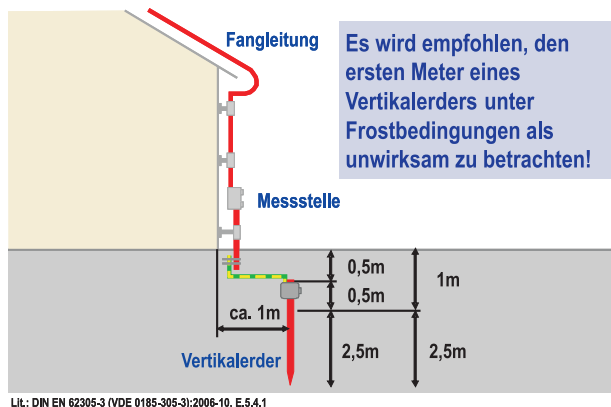


Bild 24.7: Tiefenerder [94]

3. Anordnung Typ B: Ringerder

Ein Ringerder ist ein Oberflächenerder, der in mindestens 0,5m Tiefe und möglichst als geschlossener Ring in einem Abstand von 1m (**Bild 24.8**) um das Außenfundament der baulichen Anlage verlegt wird. 80 % der Erderlänge des Ringerders müssen Kontakt mit der Erde haben. **Ringerder kommen bei isolierten Bodenplatten zum Einsatz.** Die räumliche Darstellung vom Ringerder, Potentialausgleichsleiter und der Verbindungen mittels druckwasserdichter Wanddurchführungen zeigt das (**Bild 24.9**).

4. Anordnung Typ B: Fundamenterder

Der Hauptschutzpotentialausgleich benötigt zur optimalen Funktion eine wirksame und langlebige Erdungsmaßnahme. Der Fundamenterder ist dafür sehr gut geeignet (**Bilder 24.10 bis 24.13**) .

24.3.2 Werkstoff, Form und Mindestmaße von Erdern

Allgemeine Hinweise:

- Der Überzug muss glatt, durchgehend und frei von Flussmittelresten sein mit einer Minstdicke von 50 μm für Rundmaterial und 70 μm für Flachmaterial.

Dieser Typ der Erderanordnung besteht entweder aus einem Ringerder außerhalb der zu schützenden baulichen Anlage, der über wenigstens 80 % seiner Gesamtlänge im Erdboden verlegt ist, oder aus einem Fundamenterder. Solche Erder können auch vermascht sein.

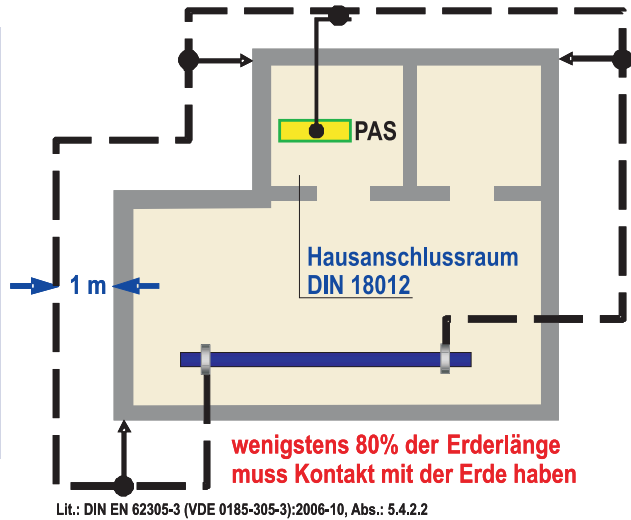


Bild 24.8: Geschlossener Ringerder [94]

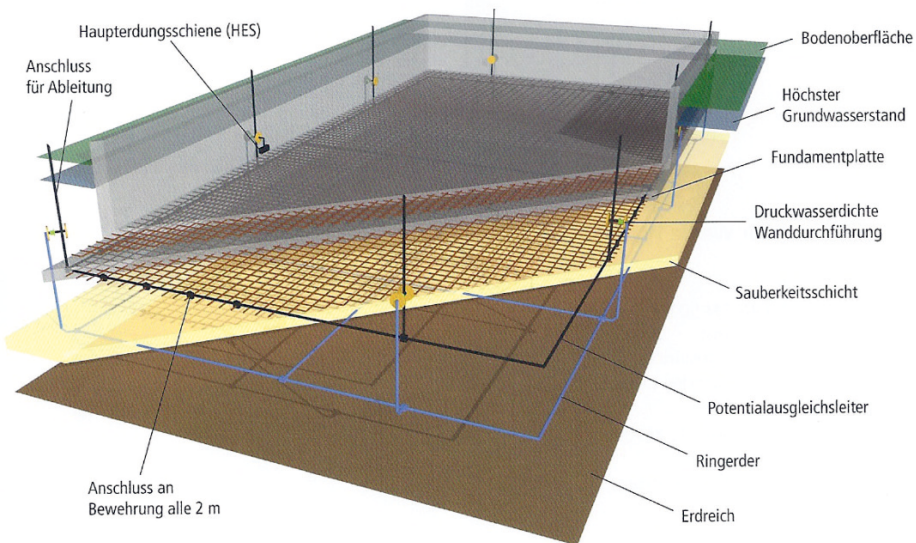


Bild 24.9: Ringerder und Potentialausgleichsleiter [98]

- Gewinde müssen vor der Verzinkung geschnitten werden.
- Auch Verzinnen ist möglich.
- Das Kupfer sollte mit dem Stahl unlösbar verbunden und vollständig in Beton eingebettet sein.
- Erder sind im erdberührenden Teil des Fundaments nur erlaubt, wenn wenig-

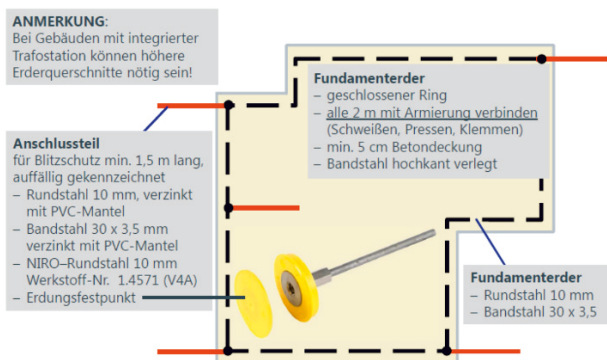
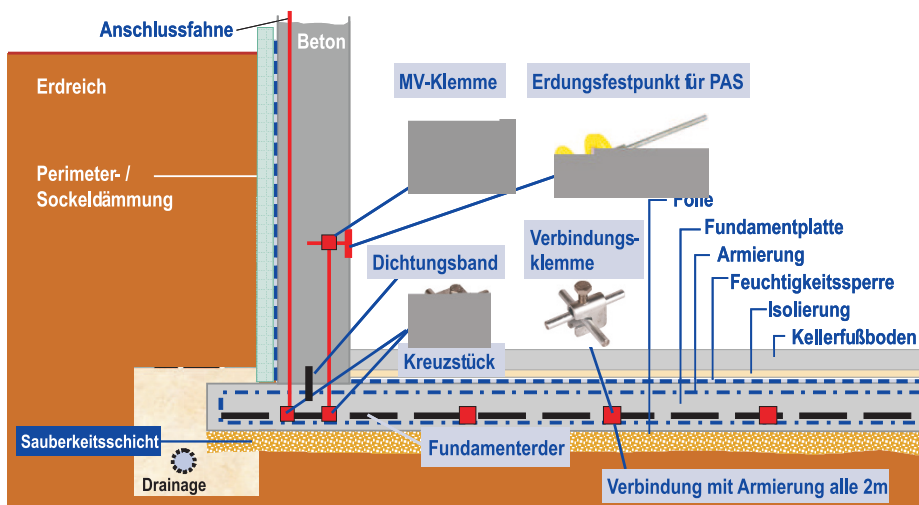


Bild 24.10: Fundamenterder [94]



Lit.: In Anlehnung an DIN 18014:2007-09; HEA Elektro "Der Fundamenterder"

Bild 24.11: Geschlossene Bodenplatte (Kellerwand isoliert) [94]

stens alle 5 m eine sichere Verbindung mit der Bewehrung besteht.

- Chrom 16 %, Nickel 5 %, Molybdän 2 %, Kohlenstoff 0,08 %.
- In einigen Ländern sind 12 mm erlaubt.
- Erdführungsstangen werden in einigen Ländern gebraucht, um die Ableitung mit dem Erder zu verbinden.

Der Fundamenterder kann als Erder für Blitzschutz-, Fernmelde- und Niederspannungsanlagen herangezogen werden. Er ist nach DIN 18014 als geschlossener Ring in den Fundamenten der Außenwände des Gebäudes anzuordnen. Bei größeren Gebäuden, d. h. mit Kantenlängen über 20 m, sind Querverbindungen zur Maschenbildung ca. 20 m x 20 m des Fundamenterders herzustellen. Für Fundamen-

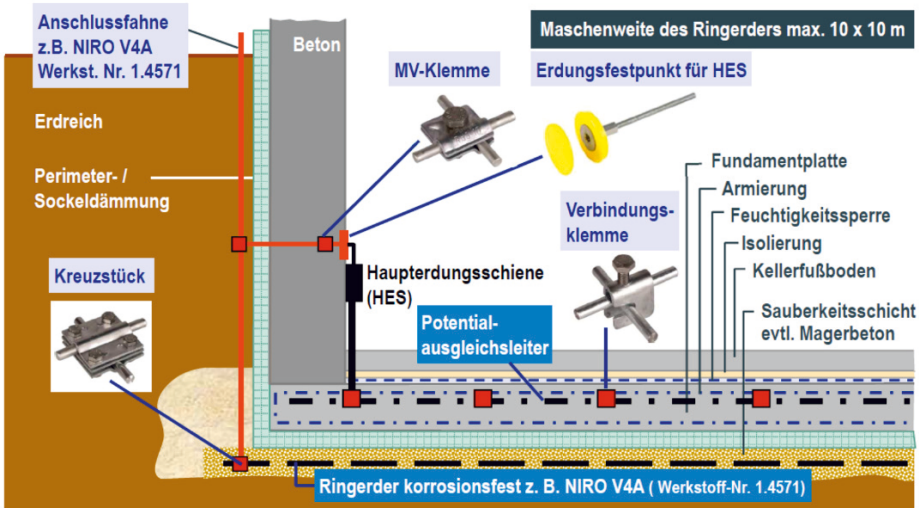


Bild 24.12: Geschlossenen Wanne, Ausführung als Vollperimeterdämmung [94]

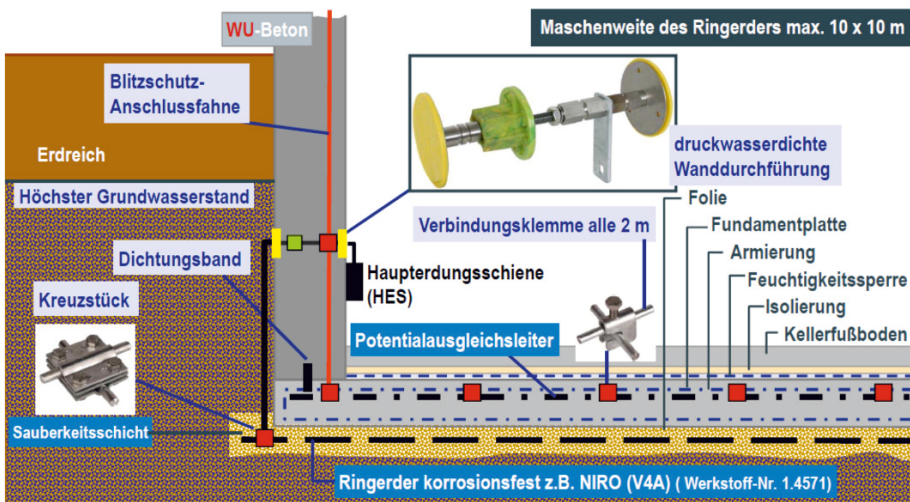


Bild 24.13: Geschlossenen Wanne, Ausführung als Weiße Wanne [94]

terder ist Bandstahl mit einem Querschnitt von mindestens $30 \text{ mm} \times 3,5 \text{ mm}$ oder Rundstahl von mindestens 10 mm Durchmesser zu verwenden. Der Ausbreitungswiderstand eines Erders ist vom spezifischen Erdwiderstand, von den Massen der Anordnung und der Länge des Erders, jedoch weniger von seinem Querschnitt abhängig. Der spezifische Erdwiderstand von verschiedenen Bodenarten wird zur Berechnung des Ausbreitungswiderstandes eines Erders benötigt. Er wird meist in Ωm angegeben und ist definiert als der Widerstand eines Erdwürfels von 1 m^3

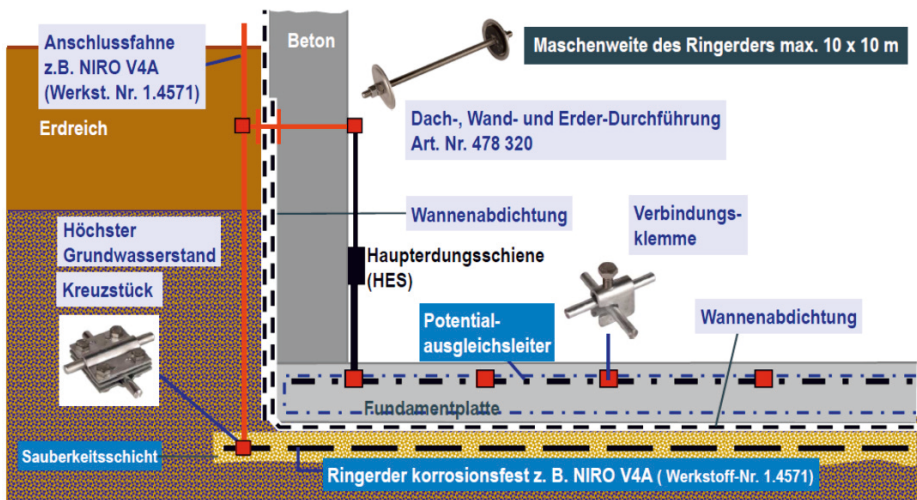


Bild 24.14: Geschlossenen Wanne, Ausführung als Schwarze Wanne [94]

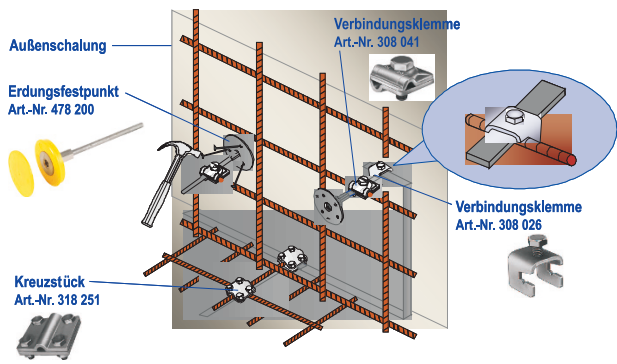


Bild 24.15: Anschluss von Erdungsfestpunkten und den Fundamenterder an die Armierung [94]

mit 1 m Kantenlänge, gemessen zwischen zwei gegenüberliegenden Würfel­flächen. **Tabelle 24.3** zeigt häufig gemessene Bodenarten nach EN 50522. **Tabelle 24.4** enthält Material, Form und Mindestabmessungen von Erdern nach DIN VDE 0185-3, Tab. 8 und **Tabelle 24.5** die Mindestabmessungen von Leitern nach DIN VDE 0185-3, Tab. 9.

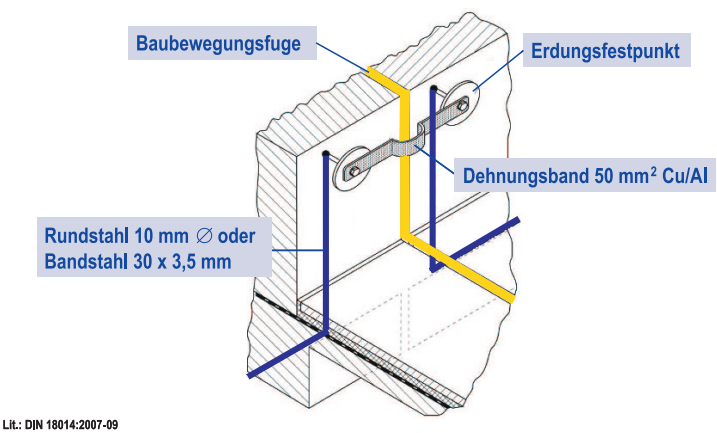


Bild 24.16: Überbrückung von Baubewegungsfugen mittels Erdungsfestpunkten [94]

Tabelle 24.3: Spezifischer Widerstand von verschiedenen Bodenarten

Art des Bodens	ρ_E in Ω m (Mittelwerte)
Moorboden	30
Lehm, Ton, Humus	100
Sand (feucht)	200
Sand (trocken)	1100
Kies (feucht)	500
Kies (trocken)	3000
steiniger Boden	1000
Granit	2500
Fels	>10000
reines Wasser (13° C)	56
reines Wasser (39° C)	34
Regenwasser	30-300
Meerwasser	0,22

24.4 Trennungsabstand

Eine Näherung ist nach DIN VDE 0185 ein zu geringer Abstand zwischen einer Blitzschutzanlage und metallenen Installationen oder elektrischen Anlagen, bei der die Gefahr eines Über- oder Durchschlags besteht. Näherungen von Fang-einrichtungen und Ableitungen zu metallenen Installationen aller Art sind durch Vergrößern des Abstandes oder durch Verbinden der Installationen mit der Blitz-schutzanlage direkt oder über Trennfunkstrecken zu vermeiden bzw. zu besei-tigen.

Tabelle 24.4: Material, Form und Mindestabmessungen von Erdern nach DIN VDE 0185-3, Tab.8

Material	Form	Mindestabmessungen		Anmerkung
Kupfer		Staberder (mm)	Erdleiter) (mm ²)	
	Seil		50	Minestdraht ϕ 1,7 mm
	Rund ^a		50	ϕ 8mm
	Band		50	Minestdicke 2 mm
	Rund	20		
Stahl	Rohr	20		Minestwandstärke 2 mm
	Rund verzinkt ^{b,c}	20		
Nicht rostender Stahl	verzinkt Rohr	25		Minestwandstärke 2 mm
	Rund	20	10	mm
	Band ^d		100	Minestdicke 3 mm

- ^a kann auch verzinnt sein.
- ^b Der Zinküberzug muss glatt, durchgehend und frei von Flussmittelresten sein, Mittelwert 50 μ m für runde und 70 μ m für flache Werkstoffe.
- ^c Das Material muss vor der Verzinkung in die entsprechende Form gebracht werden.

Tabelle 24.5: Mindestabmessungen von Leitern nach DIN VDE 0185-3, Tab.9

Verbindungsleitungen von PAS miteinander und zur Erdungsanlage		
BSK	Werkstoff	Querschnitt (mm ²)
I bis IV	Kupfer	16
	Aluminium	25
	Stahl	50
Verbindungsleitungen von inneren metallenen Installationen zur PAS nach DIN VDE 0185-3, Tab.10		
I bis IV	Kupfer	6
	Aluminium	10
	Stahl	16

Die Näherungsformel von Installationen zur Blitzschutzanlage lautet:

$$s = k_i \frac{k_c}{k_m} l \qquad \text{mit} \qquad d \geq s$$

(24.1)

Es bedeuten:

- s Sicherheitsabstand in m
- d Trennungs- oder Nherungsabstand in m
- k_c von der geometrischen Anordnung abhängiger Stromaufteilungskoeffizient nach **Tabelle 24.7**
- k_m vom Material in der Trennungsstrecke abhängiger Koeffizient nach **Tabelle 24.6**
- l Länge der Blitzschutzleitung
- k_i von der Blitzschutzklasse abhängiger Koeffizient nach **Tabelle 24.6**

Tabelle 24.6: Werte der Koeffizienten

Blitzschutzklasse	k_i	Material	k_m
I	0,1	Luft	1
II	0,075	Feststoff	0,5
III-IV	0,05		

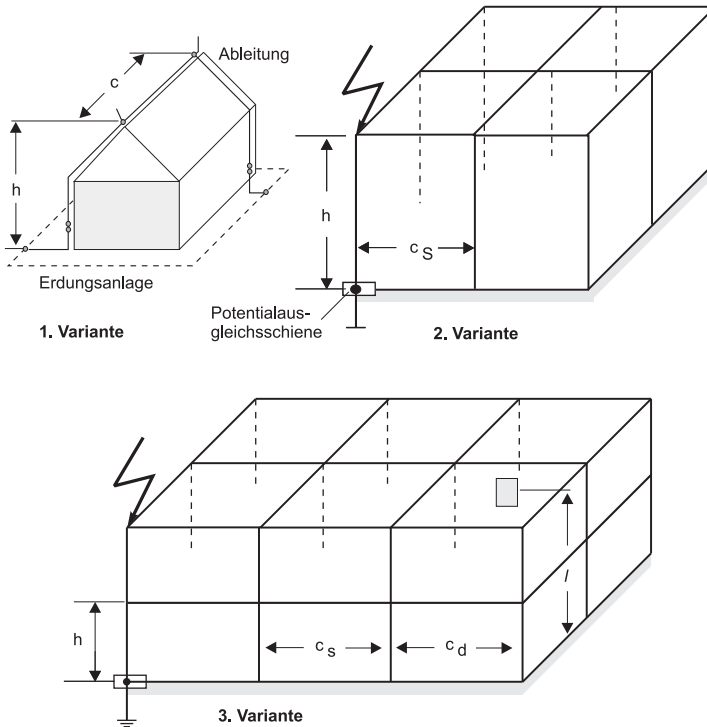
Tabelle 24.7: Werte des Koeffizienten k_c nach Typ der Fangeinrichtung

Typ der Fangeinrichtung	Ableitungen auf Erdniveau	Ableitungen auf Erdniveau
	nicht verbunden	verbunden
	c	c
einzelne Fangstange	1	1
gespannte Drähte oder Seile	1	Bild C405-1
vermaschte Leiter	1	Bild C405-2

Für die Ermittlung des Stromaufteilungskoeffizienten c sind drei Varianten möglich (**Bild 24.17**).

24.5 EMV-Blitzschutzzonen-Konzept

Das EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit)-gerechte Blitzschutzzonen-Konzept wurde in die internationale Normung eingearbeitet. Dieses Konzept ist besonders für Gebäude mit umfangreichen elektronischen Einrichtungen zu empfehlen. Das

Bild 24.17: Stromaufteilungskoeffizienten c

Prinzip dieses Konzepts ist die Raumschirmung (**Bild 24.18**).

Das Prinzip besteht darin, die durch Blitz entstandenen elektromagnetischen Felder und deren Wirkungen durch definierte Blitzschutzzonen stufenweise abzubauen. Jede einzelne Zone ist durch wesentliche Übergänge der Kennwerte der baulichen Anlage gekennzeichnet, die das Risiko beeinflussen. Dieses Prinzip ermöglicht die wirksamsten und am besten geeigneten Schutzmaßnahmen für jedes Teil einer baulichen Anlage. Entsprechend ihrer Kennwerte können die Schutzmaßnahmen nur für eine Blitzschutzzone oder für die gesamte bauliche Anlage wirksam sein. Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Zonen sind in den Potentialausgleich einzubeziehen und besondere Ableiter zu installieren. Beim EMV-Blitzschutzkonzept kann man vier Hauptbereiche unterscheiden:

1. äußerer Blitzschutz
2. Gebäudeschirmung
3. Raumschirmung
4. Geräteschirmung.

Tabelle 24.8 beschreibt die einzelnen Blitzschutzzonen.

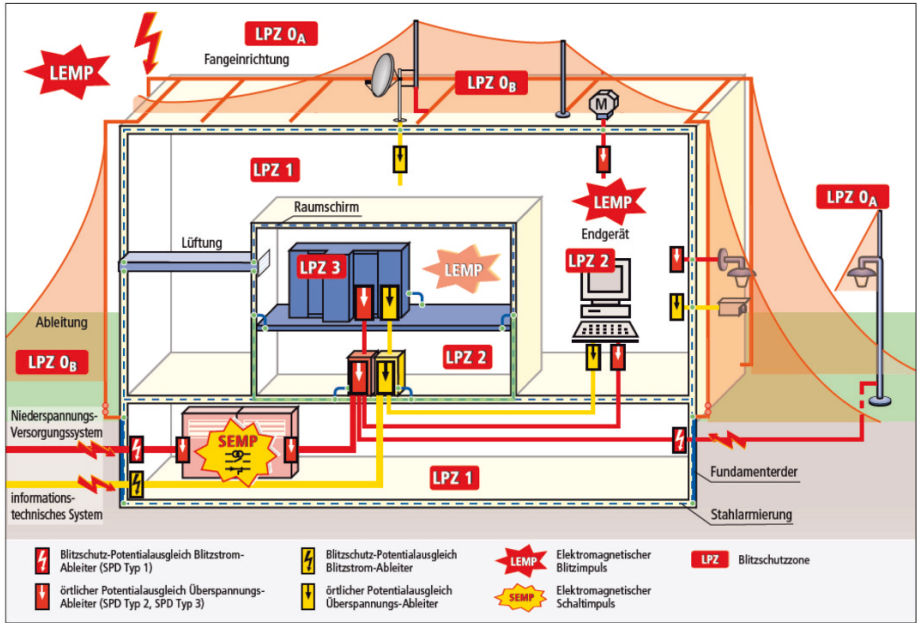


Bild 24.18: Blitzschutzzonen[95]

Tabelle 24.8: Definition der Zonenbereiche

Zone	Definition
Blitzschutzzone 0	Direkte Blitzeinwirkung möglich Keine Abschirmung gegen elektromagnetische Felder
Blitzschutzzone 0/E	Durch Fangeinrichtung gegen direkte Blitzeinwirkung geschützter Bereich keine Abschirmung gegen elektromagnetische Felder
Blitzschutzzone 1	Blitzteilströme verursachen energiereiche Transienten, die Schalthandlungen (SEMP) hervorrufen
Blitzschutzzone 2	Das elektromagnetische Feld wird weiterhin gedämpft Es entstehen Schalthandlungen und elektrostatische Entladungen (ESD)
Blitzschutzzone 3	Das elektromagnetische Feld ist auf ein Minimum reduziert

Mit den folgenden Schutzmaßnahmen kann die Schadenswahrscheinlichkeit verringert werden:

1. an bauliche Anlagen:

- Verwenden von Blitzschutzsystemen mit einer ausreichenden Schutzklasse zur Verringerung der Wahrscheinlichkeit einer physikalischen Beschädigung und von Lebensgefahr (Schäden C1 und C2)
- Installation von Überspannungsschutzgeräten am Einführungspunkt von eingeführten Leitungen und an inneren Installationen, um die Wahrscheinlichkeit eines Versagens von elektrischen und elektronischen Anlagen aufgrund von Überspannungen zu verringern (Schadensursache C3)
- Installationen von magnetischen Abschirmungen an und/oder in der baulichen Anlage und/oder magnetische Abschirmung der Ausrüstung, wenn der Schutz von empfindlichen elektronischen Ausrüstungen gegen Überspannungen gefordert ist (Schadensursache C3).

2. an Versorgungsleitungen:

- Installation von Erdungsleitungen, um die Wahrscheinlichkeit von physikalischen Beschädigungen an der Versorgungsleitung zu verringern (Schadensursache C2)
- Installation von Überspannungsschutzgeräten an den Übergangspunkten entlang einer Versorgungsleitung und Ausrüstungen an den Leitungsabschlüssen, um die Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung durch Überspannungen zu verringern (Schadensursache C3).

24.5.1 Planungsangaben zu Überspannungsableitern

Zur Planung und Projektierung von Blitzschutzanlagen stehen die neue Blitzschutznorm DIN VDE 0185 und die Überspannungsschutznorm DIN IEC 1312-1 zur Verfügung. Die Entscheidung, welche Norm angewandt wird, ist Sache des Planers und des Kunden. Die Leistungsbeschreibung muss nach VOB Teil C Blitzschutzanlagen oder nach DIN 18384 Verdingungsordnung für Bauleistungen angefertigt werden. Die einzelnen Schritte der Planung erfolgen nach HOAI. In diesem Abschnitt werden die Einsatzorte der Schutzgeräte für Blitzschutzanlagen beschrieben. Entsprechend den Überspannungskategorien werden Ableiter in Blitzstrom-Ableiter (Hauptverteilung, Anforderungsklasse Typ 1), Überspannungsableiter (Unterverteilung, Anforderungsklasse Typ 2) und in Überspannungs-Ableiter beim Endverbraucher (Steckdosen und Endgeräte, Anforderungsklasse Typ 3) unterteilt (**Bild 24.19**).

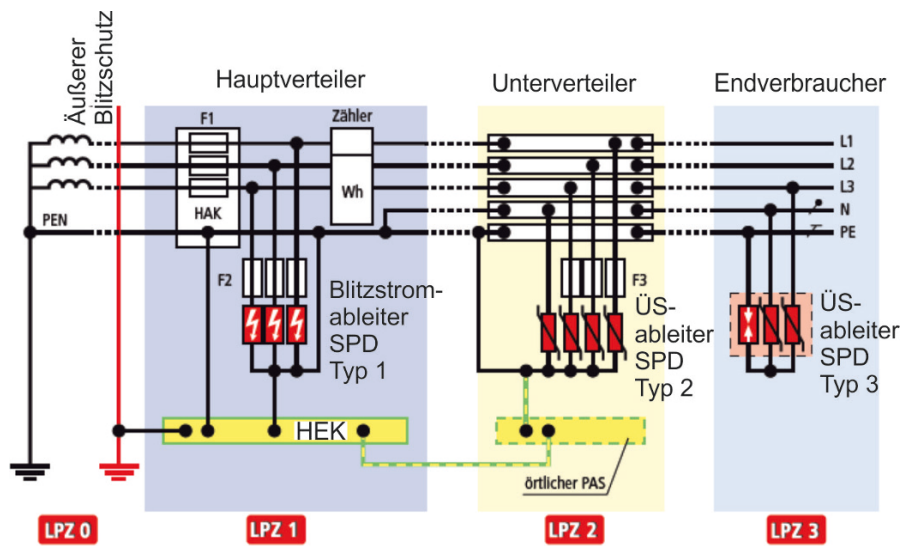


Bild 24.19: Einbauorte der Überspannungsableiter [46]

24.5.2 Anforderungsklassen für Überspannungsschutzeinrichtungen

Tabelle 24.9 zeigt verschiedene IEC,- EN- und VDE-Normen und Einsatzbereiche der Überspannungsableiter (ÜS).

Tabelle 24.9: Koordination und Auswahl von Überspannungsschutzableitern in den Normen

Typ, Bezeichnung	DIN VDE 0675-6	IEC 61643-1:1998	EN 61643-11:2001
Blitzstromableiter für NSHV	Ableiter der Anforderungsklasse B	ÜS class I	ÜS Type I
	Kabelquerschnitt 16 mm ² ausreihend		
Überspannungsableiter für UV und feste Installation	Ableiter der Anforderungsklasse C	ÜS class II	ÜS Type 2
	Kabelquerschnitt 4 mm ² ausreichend		
Überspannungsableiter für Steckdose und Endgeräte	Ableiter der Anforderungsklasse D	ÜS class III	ÜS Type 3
	Kabelquerschnitt 2,5 mm ² ausreichend		

Der Einsatz von Überspannungs-Schutzeinrichtungen kann nach TAB 2012 folgendermaßen erfolgen:

TAB 2012, Abschnitt 12, Punkt 4:

Wird ein Überspannungsschutz nach DIN VDE 0100-443 mit Überspannungs-Schutzeinrichtungen der Anforderungsklasse Typ 2 und Typ 3 nach DIN VDE 0675-6 vorgesehen, nimmt der Errichter den Einbau der Schutzeinrichtungen im nicht plombierten Teil der Kundenanlage vor.

TAB 2012, Abschnitt 12, Punkt 5:

Wird ein Überspannungsschutz nach DIN VDE 0185-100 mit Überspannungsschutz der Anforderungsklasse Typ 1 nach DIN VDE 0675-6 vorgesehen, so dürfen Überspannungs-Schutzeinrichtungen im plombierten Teil der Kundenanlage eingebaut werden.

24.6 Prüfungsmaßnahmen

Die Prüfung des Blitzschutzsystems muss von einer Blitzschutz-Fachkraft durchgeführt werden. Bei der Prüfung ist gemäß nachstehender Punkte festzustellen, dass das Blitzschutzsystem vollständig der Klassifikation DIN VDE 0185 entspricht. **Tabelle 24.10** erhält die Zeitabstände für die Prüfungen.

Tabelle 24.10: Zeitabstände für die Prüfungen in Jahren

Blitzschutzklasse	Intervall zwischen den vollständigen Prüfungen	Intervall zwischen den Sichtprüfungen
I	2	1
II	4	2
III-IV	6	3

Die Prüfung umfasst:

1. Prüfen, ob:

- die technischen Dokumentationen vollständig sind und mit den Normen übereinstimmen,
- das Gesamtsystem mit den technischen Unterlagen übereinstimmt,
- sich das Gesamtsystem des äußeren und inneren Blitzschutzes in einem ordnungsgemäßen Zustand befindet,
- lose Verbindungen und Unterbrechungen der Leitungen des Blitzschutzsystems vorhanden sind,

- Teile des Systems infolge von Korrosion deutlich geschwächt sind, besonders in Höhe der Erdoberfläche,
- alle Erdungsanschlüsse (soweit sichtbar) in Ordnung sind,
- alle Leitungen und Systembauteile ordnungsgemäß befestigt sind und Teile, die eine mechanische, Schutzfunktion haben, funktionstüchtig sind,
- Änderungen an der geschützten baulichen Anlage vorgenommen wurden, die zusätzliche Schutzmaßnahmen erfordern,
- die in energie- und informationstechnischen Netzen eingebauten Überspannungsschutzgeräte richtig eingebaut sind,
- Beschädigungen oder Auslösungen von Überspannungsschutzgeräten vorliegen,
- vorgeschaltete Sicherungen von Überspannungsschutzgeräten unterbrochen sind,
- für neue Versorgungsanschlüsse oder Ergänzungen, die im Innern der baulichen Anlage seit der letzten Prüfung, eingebaut wurden, ein lückenloser Blitzschutz-Potentialausgleich ausgeführt wurde,
- Potentialausgleichsverbindungen innerhalb der baulichen Anlage, gegebenenfalls auch in höheren Ebenen, vorhanden und intakt sind,
- die erforderlichen Maßnahmen bei Näherungen des Blitzschutzsystems zu Installationen durchgeführt wurden.

2. Messen:

- Es ist zu messen, ob alle Verbindungen und Anschlüsse von Fangeinrichtungen, Ableitungen, Potentialausgleichsleitungen, Schirmungsmaßnahmen usw., soweit nicht durch Besichtigen feststellbar, einen niederohmigen Durchgang haben (Richtwert $< 1 \Omega$). Bei der Erdungsanlage ist zu messen:
 - der Übergangswiderstand zur Erdungsanlage an allen Messstellen zur Feststellung der Durchgängigkeit der Leitungen und Verbindungen (Richtwert $< 0,1 \Omega$),
 - der Durchgang zu den metallenen Installationen (Gas, Wasser, Heizung, Lüftung usw.),
 - der Gesamterdungswiderstand des Blitzschutzsystems,
 - der Erdungswiderstand von Einzelerdern und Teilringerdern,

Bei der Prüfung des Äußeren Blitzschutzes kann man folgendermaßen vorgehen:

1. alle Trennstellen öffnen,
2. Potentialausgleichsschiene vom Erder trennen (TN-Systeme),
3. zwischen allen Anschlussstellen messen ($< 1 \Omega$),

4. alle Ableiter-/Fangeinrichtungen messen,
5. alle Ableiter-/Fangeinrichtungen besichtigen,
6. den Erdungswiderstand messen,
7. Trennstellen und Potentialausgleichsschiene wieder schließen,
8. den Potentialausgleich besichtigen,
9. alle Blitz- und Überspannungs-Ableiter prüfen.

24.7 Montagebeispiel

Für eine fachgerechte Planung einer Blitzschutzanlage ist die Gebäudebeschreibung von größter Wichtigkeit. Über den Umfang der Gebäudebeschreibung enthält DIN 48830 nähere Angaben. In der Vorplanungsphase muss die anzuwendende Blitzschutzklasse auf der Basis der zugrunde liegenden Vorschriften mit dem Auftraggeber abgestimmt werden. Für die Installation und Ausführung der Anlage sind der Montageplan und das Leistungsverzeichnis [96] zu erstellen. Detaillierte Angaben zum Planen, Bauen und Prüfen sind dem Buch [93] zu entnehmen. **Bild 24.20** zeigt beispielhaft eine detaillierte Blitzschutzanlage.

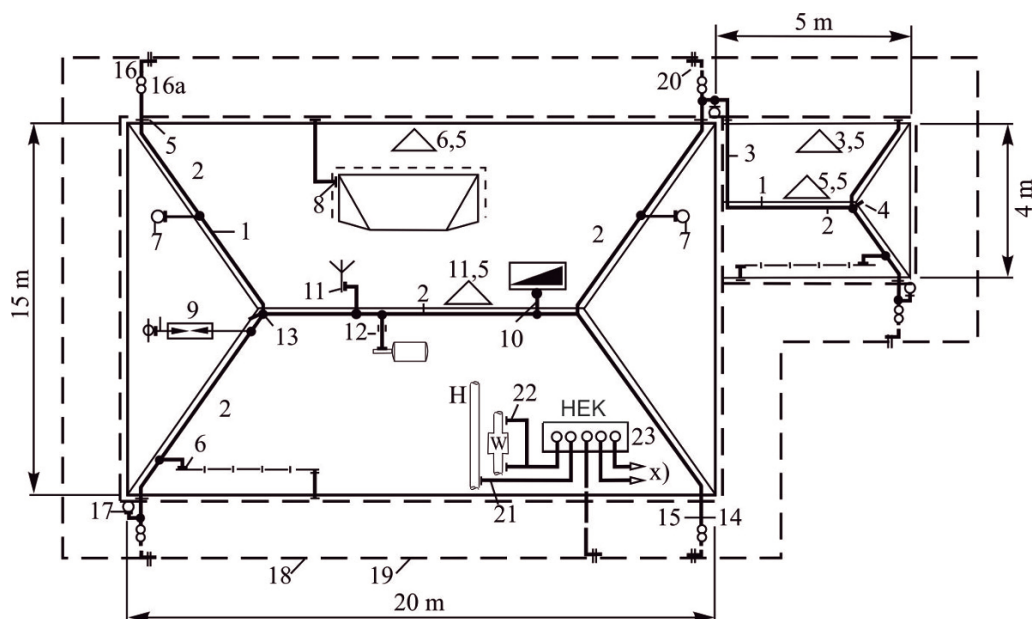


Bild 24.20: Ansicht einer Blitzschutzanlage [95]

Es bedeuten:

1	Dachleitungen	13	Universalverbinder
2, 3	Dachleitungshalter	14	Ableitungen aus Stahldraht
4	Auffangspitze	15	Leitungshalter
5	Dachrinnenklemmen	16	Erdeinführungsstangen
6	Schneefangitterklemmen	16a	Messstelle
7	Regenrohrschellen	17	Regenrohrschellen
8	Falzklemme	18	Erdleitungsgraben
9	Funkenstrecke	19	Erdleitung aus Stahldraht
10	Fangstange	20,22	Parallelverbinder
11, 12	Erdungsrohrschelle	23	Potentialausgleichsschiene

24.8 Dokumentation

Nach DIN 18014 ist über die Erdungsanlage eine Dokumentation anzufertigen und die Ergebnisse einzutragen (**Bild 24.21 und 24.22**).

DEHN-Fomblatt-Nr. 2120/0710		Seite 1
Dokumentation der Erdungsanlage nach DIN 18014		
Ersteller _____ Datum _____ Bericht-Nr. _____		
Eigentümer des Gebäudes	Name: _____ Straße: _____ PLZ, Ort: _____	
Angaben zum Gebäude	Standort: _____ Nutzung: _____ Bauart: _____ Art des Fundamentes: _____ Bauunternehmer: _____ Baujahr: _____	
Planer der Erdungsanlage	Name: _____ Straße: _____ PLZ, Ort: _____	
Errichter der Erdungsanlage	☐ Elektro-Fachbetrieb ☐ Blitzschutz-Fachbetrieb ☐ Bauunternehmen mit der Aufsicht von Elektro-/Blitzschutz-Fachkraft Firma: _____ Name: _____ Straße: _____ PLZ, Ort: _____	
Verwendung der Erdungsanlage	☐ Schutzerdung für elektrische Sicherheit Funktionserdung für: ☐ Blitzschutzsystem ☐ Antennenanlage ☐ _____ Gelten weitere Anforderungen an die Erdungsanlage z. B. 50 Hz-Kurzschlussströme (DIN VDE 0101/0141) ☐ ja ☐ nein	
Ausführung der Erdungsanlage	Art der Erdungsanlage: ☐ Fundamenterder ☐ Ringerder Werkstoff Fundamenterder: ☐ Stahl blank ☐ Stahl verzinkt Werkstoff Ringerder: ☐ Edelstahl NIRO (V4A) ☐ _____ ☐ Rundmaterial ☐ Bandmaterial ☐ _____ nach DIN EN 50164-2 (VDE 0185-202) Abmessungen: _____ Entsprechen die Verbindungselemente den Anforderungen nach DIN EN 50164-1 (VDE 0185-201) ☐ ja ☐ nein Anschlusssteile innen: ☐ Edelstahl NIRO (V4A) ☐ Erdungsfestpunkt ☐ St/tZn mit Kunststoffummantelung ☐ _____ Anschlusssteile außen: ☐ Edelstahl NIRO (V4A) ☐ Erdungsfestpunkt ☐ St/tZn mit Kunststoffummantelung ☐ _____	

Bild 24.21: Prüfung [98]

Dokumentation der Erdungsanlage nach DIN 18014

Ersteller _____ Datum _____ Bericht-Nr. _____



Beschreibung, Zeichnungen, Bilder	☐ äußeres Blitzschutzsystem	☐ liegen nicht vor	☐ Zeichnung Nr.: _____
	☐ Erdungsanlage	☐ liegen vor	☐ Bild Nr.: _____
Zweck der Dokumentation	☐ Abnahme / Übergabe ☐ _____		
	☐ Wiederholungsprüfung		
Bodenbeschaffenheit:	☐ felsig / steinig	☐ Kies	☐ _____
	☐ Sand	☐ Lehm	☐ _____
Bodeneigenschaften:	☐ trocken	☐ feucht	☐ nass
Prüfergebnis:	Die Anlage stimmt mit den vorliegenden Plänen überein ☐ ja ☐ nein		
	Die Anlage ist ohne Mängel bzgl. der Anforderungen nach DIN 18014 ☐ ja ☐ nein		
	Die Prüfung hat folgende Mängel ergeben:		

Der Prüfbericht besteht aus diesem Blatt und nebenstehenden Anlagen (z. B. Zeichnungen, Fotos)	_____		

_____ Ort

_____ Datum

_____ Unterschrift des Prüfers

Hinweis für den Eigentümer des Gebäudes

- Der Eigentümer des Gebäudes hat für die Beseitigung der Mängel zu sorgen.
- Bei baulichen Veränderungen oder Veränderung der Nutzung des Gebäudes ist umgehend der Fachbetrieb zu verständigen.

Bild 24.22: Prüfung [98]

25 Tages- und Kunstlicht

Normen zur Lichttechnik und Gebäudebeleuchtung:

**DIN EN 12464-1, DIN 5035-7, DIN 5034-1,
Arbeitsstättenrichtlinie (ASR 7/3)**

Die europäische Norm EN 12464-1 ist im März 2003 erschienen. Diese Norm ersetzt die wesentlichen Teile der DIN 5035. Außerdem beschreibt DIN 5035-7 den Anwendungsbereich der Bildschirmarbeitsplätze und DIN 5034-1 Tageslicht in Innenräumen. Die wichtigsten Themen dieses Kapitels sind:

1. Beschreibung der lichttechnischen Größen,
2. Erklärung der Beleuchtungskonzepte,
3. Beschreibung der Beleuchtungsarten,
4. Beschreibung der lichttechnischen Anforderungen,
5. Erklärung der Beleuchtungsplanung.

25.1 Begriffe und Definitionen

Bei der Planung und Projektierung von Innenraum-Beleuchtungsanlagen sind folgende Begriffe, Definitionen, Normen und Bestimmungen besonders zu beachten [115] (**Bild 25.1**):

– Lichtstrom Φ :

Der Lichtstrom ist die von einer Quelle ausgestrahlte oder von einer Fläche empfangene Lichtleistung. Die abgegebene Strahlungsleistung der Lichtquelle wird mit der spektralen Empfindlichkeit des Auges bewertet. Der Lichtstrom wird in Lumen (lm) gemessen.

Beispiel für eine Lichtquelle: Eine 58 W Leuchtstofflampe gibt einen Lichtstrom von 5400 lm ab.

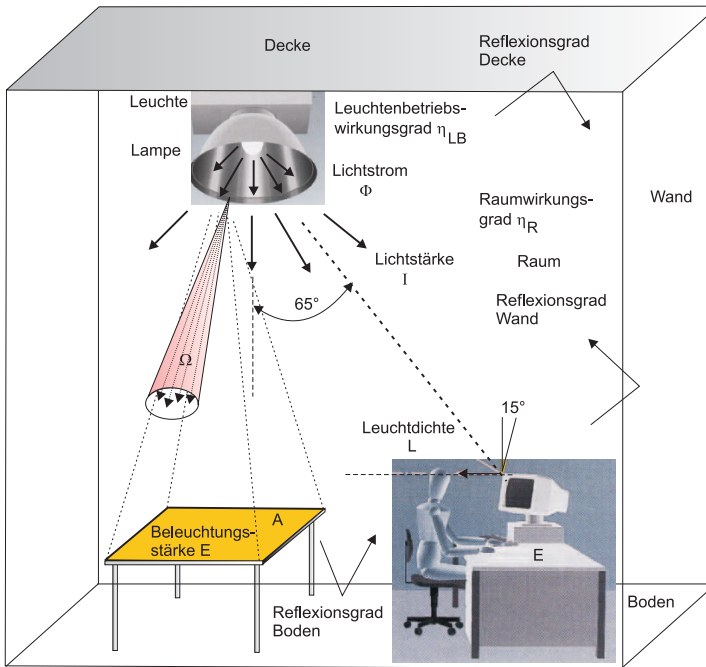


Bild 25.1: Lichttechnische Grundbegriffe [1]

– Lichtstärke I:

Die Lichtstärke ist ein Maß für die räumliche Verteilung des Lichtstromes in eine Richtung bezogen auf einen Raumwinkel. Das Lichtfeld der Lichtquellen werden in Lichtstärkeverteilungskurven (LVK) dargestellt und ist bezogen auf 1000 lm für verschiedene Bezugsebenen. Diese grafische Darstellung nennt man Polarkoordination der LVK. Die Einheit erfolgt in 1 cd (Candela) = 1 m/sr, (sr = Steradian). Candela ist eine SI-Einheit und entspricht der Strahlungsleistung von $1/683 \text{ W}$ einer monochromatischen Strahlung der Frequenz von $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$.

– Leuchtdichte L:

Die Leuchtdichte beschreibt das von einer Lichtquelle ausgehende Licht. Sie ist ein physikalisches Maß des Reizes, der den Helligkeitseindruck hervorruft und bestimmt bei großen Leuchtdichteunterschieden die Blendung. Die Einheit ist $\frac{1 \text{ cd}}{1 \text{ m}^2}$.

Das Verhalten eines Stoffes, auf den ein Lichtstrom auftritt und von ihm teilweise zurückgeworfen, absorbiert oder durchgelassen wird, beschreiben die Stoffkennzahlen Reflexionsgrad ρ , Absorptionsgrad α und Transmissionsgrad τ .

– Beleuchtungsstärke E :

Die Beleuchtungsstärke beschreibt den auf eine bestimmte Fläche auftretenden Lichtstrom. Sie wird in Lux (lx) angegeben und eine wichtige Dimensionierungsgröße für die Planung von Innenraumbeleuchtungsanlagen.

– Lichtausbeute η :

Die Lichtausbeute ist ein Maß für die Effektivität einer Lampe. Die Einheit erfolgt in lm/W . Beispiele: Energiesparlampen 60 lm/W und stabförmige Leuchtstofflampen 90 lm/W .

– Lampen:

Lampen sind technische Ausführungen von künstlichen Lichtquellen, die in erster Linie zur Lichterzeugung bestimmt sind. Sie wandeln elektrische Energie in Licht um.

Die wichtigsten Lampentypen im Wohnbereich sind:

1. LEDs sind Leuchtdioden (Light Emitting Diodes) und erzeugen nach dem RGB-Muster fast alle Farben.
2. Halogenlampen haben angenehm weißes Licht und sehr gute Farbwiedergabe. Sie können entweder mit Netzspannung oder Kleinspannung betrieben werden. Besonders energieeffizient sind Niedervolt-Halogenlampen mit Infrarotbeschichtung.
3. Energiesparlampen sind eine neue Generation von Leuchtstofflampen, lassen sich teilweise dimmen und bieten eine sehr gute Farbwiedergabe. Energiesparlampen eignen sich bestens für indirekte, diffuse Raumbeleuchtung, z. B. für Deckenfluter, größere Schirmleuchten oder Leuchten, die Stimmungslicht spenden.

– Leuchten:

Leuchten haben die Aufgabe, den von einer Lichtquelle erzeugten Lichtstrom so zu beeinflussen, dass eine optimale Beleuchtung einer Anlage erreicht wird. Leuchten sind also elektrische Betriebsmittel, die Lampen und Zubehör enthalten und das von den Lampen ausgestrahlte Licht in die gewünschte Richtung lenken.

– Leuchtenwirkungsgrad η_{LB} :

Der Leuchtenwirkungsgrad kennzeichnet das Verhältnis des aus der Leuchte austretenden Lichtstromes zum abgegebenen Gesamtlichtstrom der Lampe.

– Beleuchtungswirkungsgrad η_B :

Der Beleuchtungswirkungsgrad fasst den Leuchtenwirkungsgrad und den Raumwirkungsgrad in % zusammen.

– Raumwirkungsgrad η_R

Der Raumwirkungsgrad ist das Verhältnis des von der Bezugsfläche empfangenen Lichtstromes zu der Summe der Gesamtlichtströme der einzelnen Leuchten der Beleuchtungsanlage in %.

- Vorschaltgerät:
Ein Vorschaltgerät wird zwischen dem Versorgungsstromkreis und Entladungslampen geschaltet und dient dazu den Lampenstrom zu begrenzen.
- Sonnenlicht:
Das Sonnenlicht ist der sichtbare Anteil der direkten Sonnenstrahlung.
- Tageslicht
Tageslicht ist der sichtbare Anteil der Globalstrahlung. Tageslicht verändert die Sehaufgabe und die Beleuchtungsstärke im Verlauf des Tages und verursacht Blendung.
- Tageslichtquotient:
Verhältnis der Beleuchtungsstärke in einem Punkt einer gegebenen Ebene, die durch direktes oder indirektes Himmelslicht bei angenommener oder bekannter Lichtdichteverteilung erzeugt wird, zur Horizontalbeleuchtungsstärke bei unverbaubarer Himmelskugel. Dabei sind die Anteile des direkten Sonnenlichts bei der Berechnung von Innenraumbeleuchtung und die Einflüsse der Verglasung und Verschmutzung zu berücksichtigen.

25.2 Beleuchtungskonzepte

Folgende Planungsparameter und Anforderungen bei der Planung von Beleuchtungsanlagen sind zu beachten:

- Beleuchtungsstärke: Der Wartungswert der Beleuchtungsstärke und die Fläche müssen angegeben werden.
- Leuchtdichte: Der Wartungswert der Leuchtdichte und die Fläche müssen angegeben werden.
- Blendung: Entweder die Schwellenwerterhöhung oder UGR ist anzugeben.
- Farbe: Der Farbwiedergabeindex ist anzugeben.
- Energie: Anschlussleistung, Nutzungsdauer und Steuerung müssen bekannt sein.
- Wartung: Der Lichtplaner muss einen Wartungsfaktor festlegen.
- Licht-Messungen: Messverfahren sind anzugeben.

Bild 25.2 gibt einen Überblick über die wichtigsten Parameter für verschiedene Räume und Tätigkeiten. Weitere Daten sind EN 12464-1 Abschnitt 5 zu entnehmen.

Art des Raumes, der Aufgabe oder Tätigkeit	E_m	UGR _L	R _a
Friseur			
Haarpflege	500	19	90
Metzgerei			
Arbeitsplätze und kritische Zonen in Schlachthöfen, Metzgereien	500	25	80
Bäckerei			
Vorbereitungs- und Backräume	300	22	80
Endbearbeitung, Glasieren, Dekorieren	500	22	80
Hochregallager			
Fahrwege ohne Personenverkehr	20	–	40
Fahrwege mit Personenverkehr	150	22	60
Leitstand	150	22	60
Kontrollräume			
Räume für haustechnische Anlagen, Schaltgeräteräume	200	25	60
Telex- und Posträume, Telefonvermittlungsplätze	500	19	80
Verkehrszonen und allgemeine Bereiche			
Verkehrsflächen und Flure	100	28	40
Treppen, Rolltreppen, Fahrbänder	150	25	40
Laderampen, Ladebereiche	150	25	40
Pausen-, Sanitär-, Erste-Hilfe-Räume			
Kantinen, Teeküchen	200	22	80
Pausenräume	100	22	80
Räume für körperliche Ausgleichsübungen	300	22	80
Garderoben, Waschräume, Bäder, Toiletten	200	25	80
Sanitätsräume	500	19	80
Räume für medizinische Betreuung	500	16	90
Büros			
Ablegen, Kopieren, Verkehrszonen usw.	300	19	80
Schreiben, Schreibmaschinenschreiben, Lesen, Datenverarbeitung	500	19	80
Technisches Zeichnen	750	16	80
CAD-Arbeitsplätze	500	19	80
Konferenz- und Besprechungsräume	500	19	80
Empfangstheke	300	22	80
Archive	200	25	80

Erklärungen:
 E_m = mittlere Beleuchtungsstärke in Lux (Wartungswert, siehe Seite 4)
 UGR_L = UGR-Grenzwert (Begrenzung der Direktblendung, siehe Seite 4)
 R_a = Farbwiedergabe-Index der Lampen (siehe Seite 4)

Bild 25.2: Beleuchtungsanforderungen [112]

DIN EN 12464-1 macht keine Aussagen über die Größe des Bereiches der Sehaufgabe. Stattdessen gibt es in DIN 5035-7 drei Beleuchtungskonzepte über die Größe und die Lage der Arbeitsbereiche.

1. Raumbezogene Beleuchtung,
2. Arbeitsbereichsbezogene Beleuchtung,
3. Teilflächenbezogene Beleuchtung.

25.3 Lichttechnische Gütemerkmale

DIN EN 12464-1 beschreibt Gütemerkmale der Beleuchtung (**Bild 25.3**) wie den Wartungswert der Beleuchtungsstärke, die Bewertung der Blendung und die Farbwiedergabe der Lichtquellen. Der unmittelbare Umgebungsbereich kann mit geringen Beleuchtungsstärken beleuchtet werden [113].

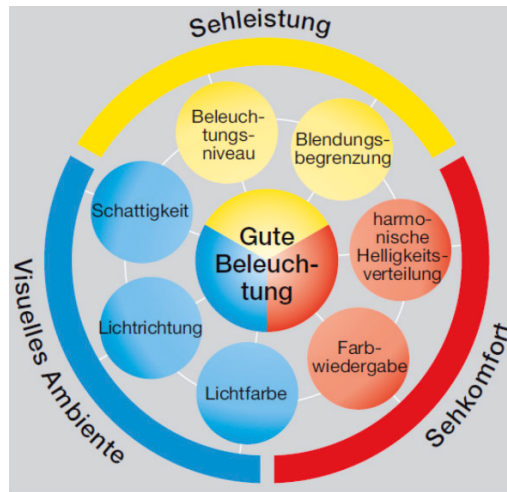


Bild 25.3: Beleuchtungsanforderungen [112]

25.4 Wartungswert der Beleuchtungsstärke

In der DIN EN 12464-1 sind Mindestwerte für Beleuchtungsstärken als Wartungswerte angegeben, nach deren Unterschreitung die Anlage gewartet, gereinigt, und die Lampen ausgetauscht werden müssen. Der Planer muss den Wartungsfaktor selbst bestimmen und einen Wartungsplan erstellen. Dieser Plan enthält:

- Intervalle für den Lampenwechsel,
- Reinigung der Leuchten und des Raumes,
- Reinigungsmethoden.

Folgende Werte sind für die Innenraumbeleuchtung zu empfehlen:

- 0,80: sehr sauberer Raum (Reinraum)
- 0,67: für einen sauberen Raum, dreijähriger Wartungszyklus
- 0,57: Außenbeleuchtungsanlagen, dreijähriger Wartungszyklus

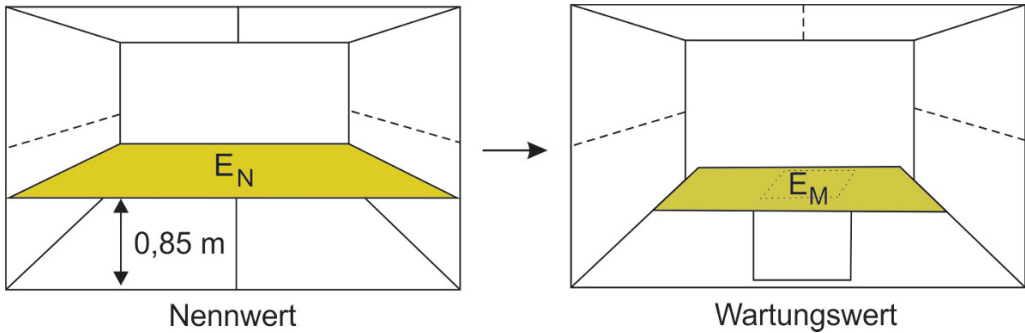


Bild 25.4: Arbeitsbereich als Bezugsebene

- 0,50: Innen- oder Außenbeleuchtungsanlagen, bei starker Verschmutzung

Der Wartungsfaktor besteht aus folgenden Größen:

- Lampenlichtstrom-Wartungsfaktor (LLWF) (beschreibt die Abnahme des Lampenlichtstroms im Laufe der Nutzungsdauer).
- Lampenlebensdauerfaktor (LLF) (beschreibt den Lampenausfall im Laufe der Nutzungsdauer).
- Leuchtenwartungsfaktor (LWF) (beschreibt den Einfluss der Verschmutzung des optischen Systems der Leuchten zwischen zwei Reinigungen) und dem
- Raumwartungsfaktor (RWF) (beschreibt die Verschlechterung der Reflexionsgrade der Raumflächen).

Der Anlagenlichtstrom und damit die Anzahl der Lampen bzw. Leuchten werden geringer, wenn der Wartungsfaktor groß ist. Ein geringer Wartungsfaktor führt zu höheren Anlagenlichtströmen und damit ggf. zu mehr Lampen, Leuchten und Investitionskosten.

25.5 Beleuchtungsstärken

Die Blendung muss begrenzt werden, um eine Herabsetzung der Sehleistung zu vermeiden. Das UGR-Verfahren zur Begrenzung der Blendung wurde für Arbeitssituationen mit vornehmlich horizontaler Blickrichtung und für regelmäßig an der Decke angeordnete Leuchten entwickelt (**Bild 25.5**).

Die Beleuchtungsstärke und ihre Verteilung im Bereich der Schaufgabe und im Umgebungsbereich haben großen Einfluss auf die Sehleistung und den Sehkomfort. Die Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke ist als Quotient E_{min}/E aus der minimalen und der mittleren Beleuchtungsstärke im Bereich der Schaufgabe

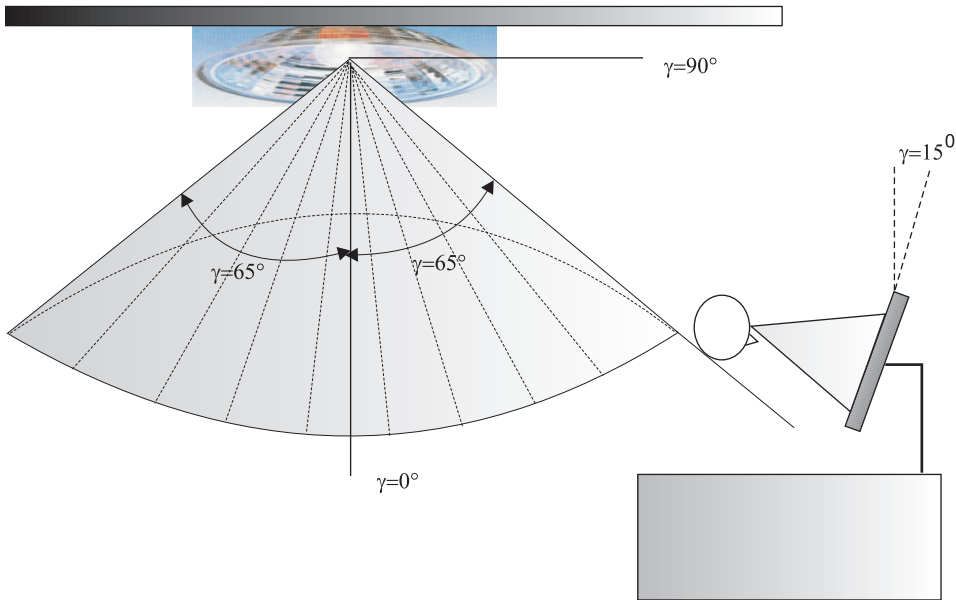


Bild 25.5: Begrenzung der Direktblendung

definiert und als ein Faktor von 1,5 angegeben.

25.6 Begrenzung der Direktblendung

Blendung ist eine Störung durch zu hohe Leuchtdichten oder durch zu hohe Leuchtdichteunterschiede, die zu Unfällen, Fehlern und Ermüdung führen kann. Die Beurteilung der Blendung wird nach der internationalen UGR-Methode (Unified Glare Rating) durchgeführt. Je größer dieser Wert ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit der Blendung. Der Grad der Direktblendung durch Leuchten einer Beleuchtungsanlage im Innenraum kann nach einer Formel bestimmt werden: Der UGR-Wert wird von folgenden Größen beeinflusst:

- Raumgröße,
- Leuchtdichte der Blendquelle (z. B. gesehene leuchtende Fläche einer Leuchte),
- vom Beobachter aus gesehene Größe der Blendquelle,
- Lage der Blendquelle im Gesichtsfeld,
- Umfeldleuchtdichte.

25.7 Beleuchtungsarten

25.7.1 Allgemeinbeleuchtung

- Der Raum wird gleichmässig ausgeleuchtet.
- Die Anordnung der Arbeitsplätze ist veränderbar (seitlicher Lichteinfall wird empfohlen).

Beispiele: Büros und Industrie.

25.7.2 Arbeitsplatzorientierte Allgemeinbeleuchtung

- Die Arbeitsplätze haben fest angeordnete Raumzonen.
- Das Beleuchtungsniveau ist hoch.

Beispiele: Fertigungsbetriebe, Büros.

25.7.3 Einzelplatzbeleuchtung

- Einzelne Arbeitsplätze mit höheren Ansprüchen werden intensiver beleuchtet.

Beispiele: Prüftische und Drehmaschinen.

25.8 Lichttechnische Anforderungen

1. Beleuchtungsniveau:

Eine ausreichende Beleuchtungsstärke ist für das Beleuchtungsniveau erforderlich, das bei der Planung und Bewertung einer Anlage zugrunde zu legen ist. Die Nennbeleuchtungsstärke bezieht sich auf einen mittleren Alterungs- und Verschmutzungszustand. Bei Anlagen mit normaler Verschmutzung wird mit einem Planungsfaktor von 1,25, bei erhöhter mit einem Faktor von 1,43 und bei starker Verschmutzung mit 1,67 gerechnet. Die maßgebende Ebene ist 0,85 m über dem Fußboden auf der horizontalen Arbeitsfläche, in der die Sehaufgabe stattfindet. Das Verhältnis der vertikalen zur horizontalen Beleuchtungsstärke beträgt $E_v = 1/3 \cdot E_h$. Die Höhe der Nutzebene in Sportplätzen und in Sporthallen liegt bei 1,0 m und auf Verkehrswegen bei 0,20 m über dem Boden.

2. Gleichmäßigkeit der Beleuchtung:

Alle Arbeitsplätze müssen gleich beleuchtet sein. Die Reflexionsgrade sollten eingehalten werden. Gemäß DIN 5035 muss der Wert $E_{min}/\overline{E} = 1/1,5$ eingehalten werden.

3. Blendungsbegrenzung:

Durch Beleuchtungsanlagen darf weder eine direkte noch eine Reflexblendung entstehen. Für die Bewertung der Direktblendung sind die Güteklassen gemäß DIN 5035 in Verbindung mit der geforderten Nennbeleuchtungsstärke maßgebend.

4. Lichtrichtung und Schattigkeit:

Die Blickrichtung sollte grundsätzlich parallel zur Leuchtenachse verlaufen. Eine günstige Anordnung der Leuchten ist dann gegeben, wenn das Licht von links oben einfällt. Eine ausreichende Schattigkeit muss gewährleistet sein.

5. Lichtfarbe und Farbwiedergabe:

Die Strahlungsverteilung einer Lampe ist maßgebend für die Lichtfarbe. Sie wird als Farbtemperatur in Kelvin (K) gemessen. Die Lichtfarbe von Leuchtstofflampen wird eingeteilt in drei Gruppen:

- warmweiß (ww): für Entspannung und Erholung mit hohem Rotanteil, Farbtemperatur unter 3300K,
- neutralweiß (nw): für Handwerk und Industrie, Farbtemperatur von 3300K bis 5300K,
- tageslichtweiß (tw): für bestimmte Arbeitsräume und -plätze, Farbtemperatur über 5300K.

Die Farbwiedergabe R_a beeinflusst das Aussehen der beleuchteten Gegenstände. Nach DIN 5035 gibt es 6 Stufen der Farbwiedergabeeigenschaften. Für Wohn- und Innenräume wird mindestens die Stufe 3 ($R_a = 80$) gefordert. Halogenlampen erreichen ($R_a = 100$), Energiesparlampen ($R_a \geq 80$). Der höchstmögliche Farbwiedergabe-Index ist 100.

25.9 Auswahl und Errichtung der Betriebsmittel

Betriebsmittel müssen:

- den geltenden Regeln der Technik entsprechen,
- für den vorgesehenen Verwendungszweck geeignet sein,
- ein Ursprungszeichen tragen und
- mit den Nenngrößen gekennzeichnet sein.
- Zusätzlich muss die Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen sichergestellt sein und
- es dürfen von diesen elektrischen Anlagen keine Gefahren ausgehen.

Für die Hausinstallation gelten folgende Bestimmungen:

Lichtstromkreise oder kombinierte Stromkreise mit Steckdosen dürfen nur mit max. 16-A-LS-Schaltern abgesichert werden. Nach TAB müssen sie über ein Schaltvermögen von 6 kA verfügen und der Selektivitätsklasse 3 entsprechen. Für

alle anderen Räume dürfen Lichtstromkreise max. mit 25 A oder kleiner abgesichert werden. Die Drehstromkreise müssen durch einen Schalter, der alle nicht geerdeten Leiter gleichzeitig schaltet, freigeschaltet werden können.

Bei der Auswahl von Leuchten sind zu berücksichtigen:

- die zulässige Gebrauchslage,
- das Brandverhalten der Montagefläche,
- die thermische Wirkung auf die Umgebung,
- die Mindestabstände von Strahlerleuchten,
- die Aufhängevorrichtung - für 5faches Gewicht, mind. 10 kg,
- die Waddosen bei Unterputzinstallation und
- die Ausführung der Durchgangsverdrahtung mit wärmebeständigen Leitungen.

25.10 Beleuchtungsplanung

Für die Planung und Projektierung von Beleuchtungsanlagen sind folgende Empfehlungen für die Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen:

- Hohe Lichtausbeute der Leuchtmittel:
Dreibanden-Leuchtstofflampen haben eine bis zu 30% höhere Lichtausbeute als Standard-Leuchtstofflampen.
- Geringe Verlustleistung der Vorschaltgeräte:
Elektronische Vorschaltgeräte haben eine bis zu 62% geringere Verlustleistung und erhöhen die nutzbare Lebensdauer der Leuchtstofflampen.
- Hohe Wirkungsgrade der Leuchten:
Spiegelrasterleuchten mit Betriebswirkungsgraden bis zu 75% sind energiewirtschaftlich günstiger als opale Wannenleuchten.
- Hohe Beleuchtungswirkungsgrade durch
 1. zweckmäßige Leuchtensysteme und optimale Anordnung
 2. zweckmäßige Raumgestaltung
 3. Auswahl wirtschaftlicher Leuchtmittel
 4. computeroptimierte Planung

Weitere für die Planung einer Beleuchtungsanlage wichtige Punkte sind:

- Grundrisspläne und Höhenschnitt der Räume mit Fenstern und Türen
- Die Beschaffenheit der Räume (Reflexionsgrade)

- Die Nutzung der Räume
- Angaben über Raumtemperatur (verminderter Lichtstrom bei niedriger Temperatur)
- Die Betriebsstunden der Beleuchtungsanlage
- Die Auswahl der Leuchten

An dieser Stelle werden die wichtigsten lichttechnischen Grundgrößen zur besseren Übersicht und Berechnung der Beleuchtungsanlagen angegeben (**Tabelle 25.1**).

Tabelle 25.1: Lichttechnische Grundgrößen

Größe	Formel	Einheit
Lichtstrom	Φ	Lumen (lm)
Lichtstärke	$I = \frac{\Phi}{\Omega}$	Candela (cd)
Lichtmenge	$Q = \Phi \cdot t$	Lumenstunde (lm.h)
Beleuchtungsstärke	$E = \frac{\Phi}{A}$	Lux (lx)
Lichtausbeute	$\eta = \frac{\Phi}{P}$	Lumen/Watt (lm/W)
Betriebswirkungsgrad	$\eta_{LB} = \frac{\Phi_L}{\sum \Phi}$	
Raumwirkungsgrad	$\eta_R = \frac{\Phi_N}{\sum \Phi_L}$	
Beleuchtungswirkungsgrad	$\eta_B = \eta_R \cdot \eta_{LB}$	
Beispiel für eine Standardglühlampe Leistung: 100 W, Lichtstrom: 1380 lm, Lichtausbeute: 13,8 lm/W Ω : Raumwinkel		

25.10.1 Berechnung mit der Lichtstärkemethode

Die Berechnung mit der Lichtstärkemethode erfordert die Kenntnis der Lichtstärkeverteilungskurve für die vorgesehenen Leuchte. Die Beleuchtungsstärke wird in vorgegebenen Berechnungspunkten auf der Ebene berechnet.

Für die Berechnungspunkte wird ein Mittelwert der mittleren Beleuchtungsstärke ermittelt. Die Lichtstärkemethode kann für linienförmige-, flächenförmige und punktförmige Lichtquellen angewandt werden [89].

25.10.2 Lichtstrommethode (Wirkungsgradverfahren)

In der Praxis hat sich das überschlägige Wirkungsgradverfahren für die Dimensionierung von Beleuchtungsanlagen bewährt, für das nachfolgend der Rechengang erklärt wird. Bei diesem Rechenverfahren wird eine gleichförmige Leuchtenverteilung eines Leuchtentyps vorausgesetzt. Für Räume mit Einrichtungen, die die Lichtverhältnisse nachhaltig beeinflussen, sind detaillierte Planungen mit Computerprogrammen notwendig. Voraussetzungen für die Berechnung der Beleuchtungsanlagen sind Angaben über

- die Raumabmessungen,
- die Reflexionsgrade von Decke, Wänden und Boden,
- die Art der Tätigkeit bzw. Sehaufgabe,
- die Möblierung und
- die Auswahl der Lampen, Leuchten und deren Anordnung.

notwendig. Dieses Verfahren dient einer schnellen Kostenveranschlagung der Anlage.

Das Verfahren der Berechnung ist:

Für jeden Leuchtentyp existiert, in Verbindung mit einem bestimmten Raum, ein Beleuchtungswirkungsgrad. Dieser Beleuchtungswirkungsgrad wird außer von den lichttechnischen Eigenschaften der Leuchte auch von den Raumabmessungen und den Reflexionsgraden der Raumbegrenzungsflächen Decke, Wände und Boden beeinflusst.

- Zuerst wird der Raumindex k ermittelt nach der Formel:

$$k = \frac{a b}{h(a + b)} \quad (25.1)$$

mit $h = H - l_p - e$

Es bedeuten:

- a Raumlänge
- b Raumbreite
- h Lichtpunkthöhe in m
- H Raumhöhe in m
- e Höhe der Bewertungsebene über dem Boden
- l_p Pendellänge bzw. Abhängung in m

- Nach Ermittlung des Raumindex k kann die für eine mittlere Beleuchtungsstärke

erforderliche Leuchtenanzahl berechnet werden. Es gilt:

$$n = \frac{E_n A \cdot 100}{z \Phi \eta_B M}$$

(25.2)

- Die mittlere horizontale Beleuchtungsstärke $\overline{E}$ kann mit der berechneten Leuchtenanzahl bestimmt werden. Es gilt:

$$\overline{E} = \frac{N z \Phi \eta_B M v}{A \cdot 100}$$

(25.3)

Es bedeuten:

- E_n

Nennbeleuchtungsstärke in Lux (lx)
- A

Grundfläche des Raumes in m²
- z

Anzahl der Lampen je Leuchte
- v

Verminderungsfaktor, berücksichtigt Verschmutzung und Alterung von Lampen, Leuchten und Raum
- η_B

Beleuchtungswirkungsgrad gemäß Datenblatt in %, abhängig von den Leuchteneigenschaften, den Reflexionsgraden von Decke, Wänden und Boden und den Raumabmessungen, die durch den Raumindex k ausgedrückt werden
- Φ

Lichtstrom einer Lampe gemäß Datenblatt in lm
- $\overline{E}$

mittlere Beleuchtungsstärke in Lux (lx)
- n

berechnete Leuchtenanzahl (Stück)
- N

gewählte oder gegebene Leuchtenanzahl (Stück)
- M

Multiplikator für η_B

Tabelle 25.2: Raumdaten

Länge a	45	m
Breite b	16	m
Fläche $A = a b$	720	m ²
Höhe H	7	m
Abstand der Bewertungsebene über Boden e	0,85	m
Pendellänge, Abhängung l_p	1	m
Lichtpunkthöhe $h = H - l_p - e$	5,15	m
Raumindex $k = \frac{a b}{h(a+b)}$	2,3	
Reflexionsgrade Decke/Wände/Boden	0,5/0,3/0,1	

Tabelle 25.3: Richtwerte gemäß ASR 7/3 bzw. DIN 5035 T2

Art des Raumes	Buchbinderarbeiten	lx
Nennbeleuchtungsstärke E_n	300	
Lichtfarbe	ww/nw	
Stufe der Farbwiedergabeeigenschaften	2A	
Güteklasse der Blendungsbegrenzung	1	
Verminderungsfaktor v	0,8	
Gleichmäßigkeit $g_1 = E_{min}/\overline{E}$	1/1,5	

25.10.3 Wirkungsgrade

Für die Beleuchtungsplanung nach dem Wirkungsgradverfahren ist der Beleuchtungswirkungsgrad η_B maßgebend. Er ist außer von den lichttechnischen Eigenschaften der Leuchten auch von den Abmessungen des Raumes, die durch den Raumindex k erfasst sind, und den Reflexionsgraden der Decke, der Wände und des Bodens abhängig.

25.10.4 Richtwerte für die Beleuchtungsplanung

Für die überschlägige Berechnung des Leistungsbedarfs und der Lampenanzahl kann man **Tabelle 25.4** und **Tabelle 25.5** heranziehen.

Tabelle 25.4: Leistungsbedarf bei einer Nennbeleuchtungsstärke $E_n = 500$ lx mit Leuchtstofflampen L 15 bis L 58/65 [110]

Raumgröße	Grundfläche m ²	Leistungsbedarf in W/m ²
mittel	30	15
groß	150	13

25.11 Leuchten

Leuchten sind erforderlich für die Befestigung und den Schutz der Lampen und Zubehör. Sie lenken das Licht in gewünschte Richtung durch Reflektoren und

Tabelle 25.5: Lichtstrombedarf bei einer Nennbeleuchtungsstärke $E_n=100\text{ lx}$ [110]

Raumgröße	Grundfläche m ²	Lichtstrom in lm/m ²
mittel	30	225
groß	100	200

Raster. Leuchten werden in unterschiedlichen Bereichen eingesetzt. **Tabelle 25.6** gibt Anwendungsbereiche der Leuchten mit Leuchtstofflampen an.

Tabelle 25.6: Anwendung der Leuchten mit Leuchtstofflampen

Beschreibung	Anwendung
Freistrahkende Leuchten	nur für Nebenräume geeignet
Wannenleuchten	aus gestalterischen Gründen
Rasterleuchten	für Büros, Flure, Treppen und Gänge geeignet
Feuchtraumleuchten	für Schulungsräume, Werkstätten
Explosionssgeschützte Leuchten	Zeichensäle und Montageräume geeignet
Hallen-Reflektor-Leuchten	für Waschräume und Lagerplätze geeignet
Industrie-Reflektor-Leuchten	für explosionsgefährdete Räume geeignet
	in hohen Hallen
	für Räume bis 4 m Höhe

Die Einteilung der Lichtstromverteilung erfolgt nach DIN 5040:

- Buchstabe A: Direktleuchten (**Bild 25.6**)
- Buchstabe B: Vorwiegend Direktleuchten
- Buchstabe C: Gleichförmig
- Buchstabe D: Gleichförmig Indirektleuchten (**Bild 25.6**)
- Buchstabe E: Indirekt (**Bild 25.6**)

25.12 Tageslichtplanung

Die Nutzung des Tageslichts erfordert eine Beurteilung der Tageslichtverhältnisse im und am Gebäude, der Lichtdichteverteilungen des Himmels und die Beleuchtungsstärken im Freien. Folgenden Gesichtspunkte müssen bei der Beurteilung

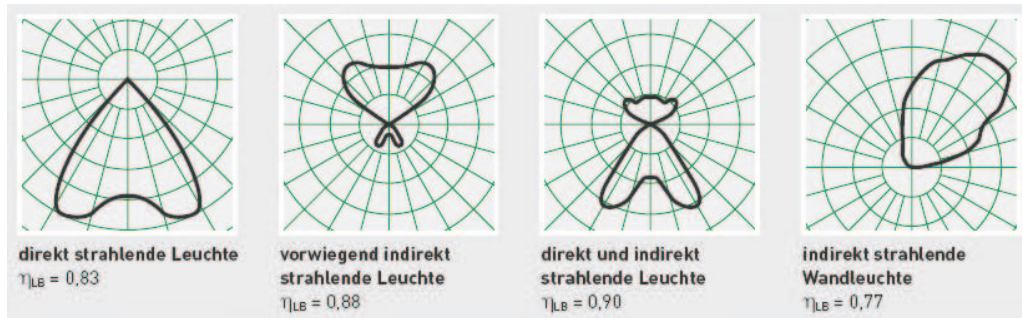


Bild 25.6: Leuchtensysteme und deren Leuchtenbetriebswirkungsgrade

des Tageslichts betrachtet werden:

1. Architektonische Aspekte / solares Bauen
2. Psychologische Aspekte
 - Sichtverbindung nach außen / ArbStättV, LBO, DIN 5034, BG
 - ausreichende Helligkeit / DIN 5034
3. Physiologische Aspekte / beleuchtungstechnische Aspekte
 - dynamisch / Beleuchtungsniveau und Farbe
 - seitlicher Lichteinfall (Fester)
 - hohes Beleuchtungsniveau
 - ungleichmäßige Beleuchtung durch Seitenfenster
4. Gesundheitliche Aspekte
 - Kunstlichtbeleuchtung = biologische Finsternis
 - Tageslicht gegen Winterdepression
5. Störende Wirkungen
 - Wärme-und Strahlungsbelastung
 - Blendung / direkt und indirekt / Bildschirmarbeitsplätze
6. Energetische Aspekte

Arbeitsstättenverordnung - ArbStättV:

Arbeitsstätten müssen möglichst ausreichend Tageslicht erhalten und mit Einrichtungen für eine der Sicherheit und dem Gesundheitsschutz der Beschäftigten angemessenen künstlichen Beleuchtung ausgestattet sein. Arbeitsstättenrichtlinien ASR 7/1, Sichtverbindung nach außen.

1. Grundsatz:

Die Sichtverbindung nach außen muss in Augenhöhe durch Fenster, durchsichtige Türen oder Wandflächen den Ausblick aus dem jeweiligen Raum ins Freie ermöglichen.

2. Als Sichtverbindung dienende Fenster, Türen oder Wandflächen

– Beschaffenheit:

Die als Sichtverbindung vorgesehenen Fenster, Türen oder Wandflächen müssen aus durchsichtigem Glas oder einem anderen in gleicher Weise durchsichtigen Werkstoff bestehen.

– Lage:

Die Unterkante der Fenster bzw. der durchsichtigen Flächen in Türen soll zwischen 0,85 m und 1,25 m über dem Raumfußboden liegen, je nachdem, ob die Arbeitnehmer im Raum überwiegend sitzen oder stehen.

– Abmessungen von Fenstern:

1. Die durchsichtigen Flächen der als Sichtverbindung vorgesehenen Fenster sollen mindestens betragen: - bei einer Raumtiefe bis einschl. 5,0 m: 1,25 m²,
- bei einer Raumtiefe von mehr als 5,0 m: 1,50 m².

2. Als Sichtverbindung vorgesehene Fenster sollen mindestens: - eine Höhe von 1,25 m und
- eine Breite von 1,00 m haben.

– Gesamtfläche der Sichtverbindungen:

Im Rahmen des bautechnisch Möglichen sollen sich die als Sichtverbindung erforderlichen Flächen nach der jeweiligen Raumgrundfläche richten. Für Räume mit einer Grundfläche bis zu 600 m² soll die Gesamtfläche der Sichtverbindungen 1/10 der Raumgrundfläche betragen.

Die Norm DIN 5034 legt fest, wie in Wohn- und Arbeitsräumen eine akzeptable Sichtverbindung nach außen und eine ausreichende Helligkeit mit Tageslicht zu erreichen ist. Aufenthaltsräume sollen die notwendige Sichtverbindung nach außen haben und ausreichend Tageslicht erhalten.

Die in den Bauordnungen der Länder geforderte, auf die Grundfläche des Raumes bezogene Mindestfensterfläche ist hinsichtlich der Beleuchtung mit Tageslicht eine notwendige, aber nicht ausreichende Voraussetzung.

Ausreichende Helligkeit:

Die ausreichende Helligkeit in Innenräumen wird über den Tageslichtquotient bestimmt. Der Tageslichtquotient D (Daylightfactor) wird als Verhältnis der Beleuchtungsstärke E_p in einem Punkt einer gegebenen Ebene, die durch direktes und/oder indirektes Himmelslicht bei angenommener oder bekannter Leuchtdichte-Verteilung des Himmels erzeugt wird, zur gleichzeitig vorhandenen Horizontalbeleuchtungsstärke E_a im Freien bei unverbaute Himmelskugel definiert.

Beispiel: Planung eines Büros

In einem Büro mit den Abmessungen (5x5) m soll Rasterleuchten geplant werden. Die Lampen und Leuchten sind wie folgt beschrieben (**Bild 25.7**):

4 Leuchtstofflampen mit jeweils 18 W, mit VVG induktiv, mit Starter Einbauleuchte mit BAP-Spiegelraster.

Leuchtenkörper aus Stahlblech mit profilierten Seitenflächen, weiß beschichtet. Stirnseitige Ausbrechöffnungen für Durchgangsverdrahtung; BAP-Spiegelraster aus Reinstaluminium glanzeloxiert.

Leuchtdichtebegrenzung $L \leq 200 \text{ cd/m}^2$ für einen Ausstrahlungswinkel oberhalb 50° zur Senkrechten.

sicherer Halt durch Schnellverschlüsse.

werkzeuglos beidseitig einhäng- und abklappbar. Montage in Decken mit sichtbaren T-Profil werkzeuglos ohne Zubehör durch Einlegen von oben, Decken mit verdeckten T-Profil mit dem Universal-Befestigungsbügel-Satz.

Verdrahtung anschlussfertig, aus wärmebeständigen Leitungen, schraublose Leuchtenanschlussklemme $5 \times 2,5 \text{ mm}^2$ für Netzanschluss und Weiterverdrahtung.

Die wichtigsten Daten und Berechnungsergebnisse sind im **Bild 25.8** und **25.9** dargestellt.

Leuchtendaten

Leuchten-Wirkungsgrad	: 57.2% (A30)
Betriebsmittel	: VVG induktiv, mit Starter
tot. Systemleistung	: 84 W
Länge	: 622 mm
Breite	: 622 mm
Höhe	: 95 mm

Bestückung mit

Anzahl	: 4
Bezeichnung	: FD-Ø26
Leistung	: 18 W
Farbe	: nw/4000K
Lichtstrom	: 1350 lm

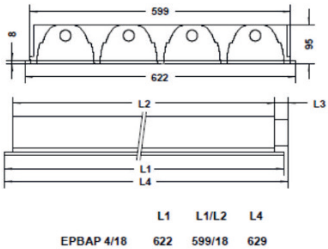
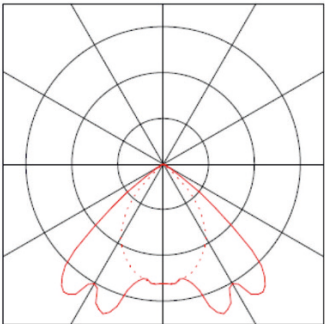


Bild 25.7: Einbau-Rasterleuchten

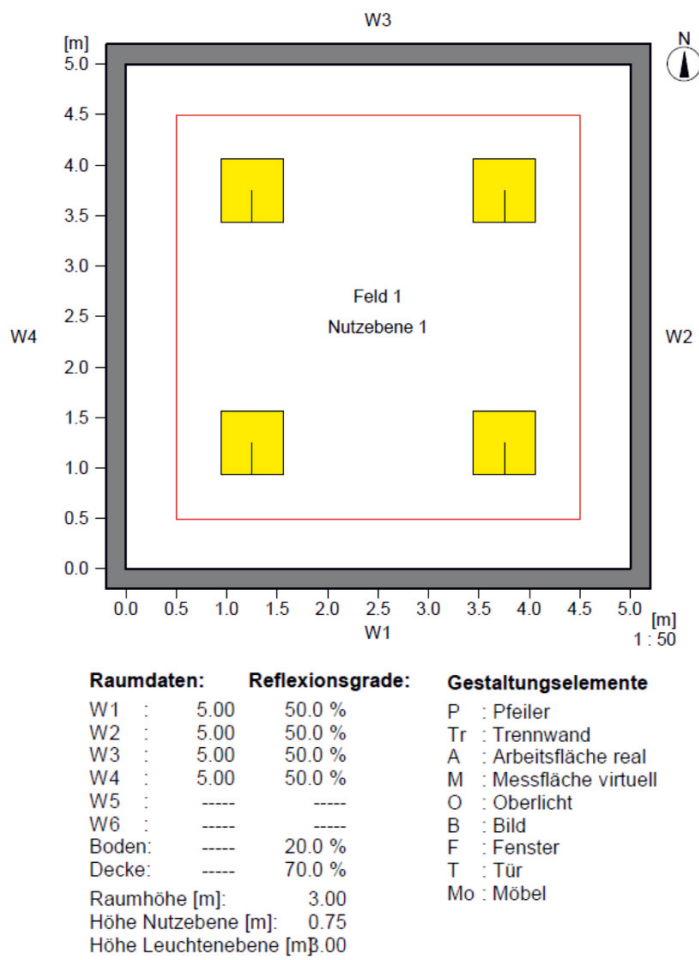


Bild 25.8: Raumdaten

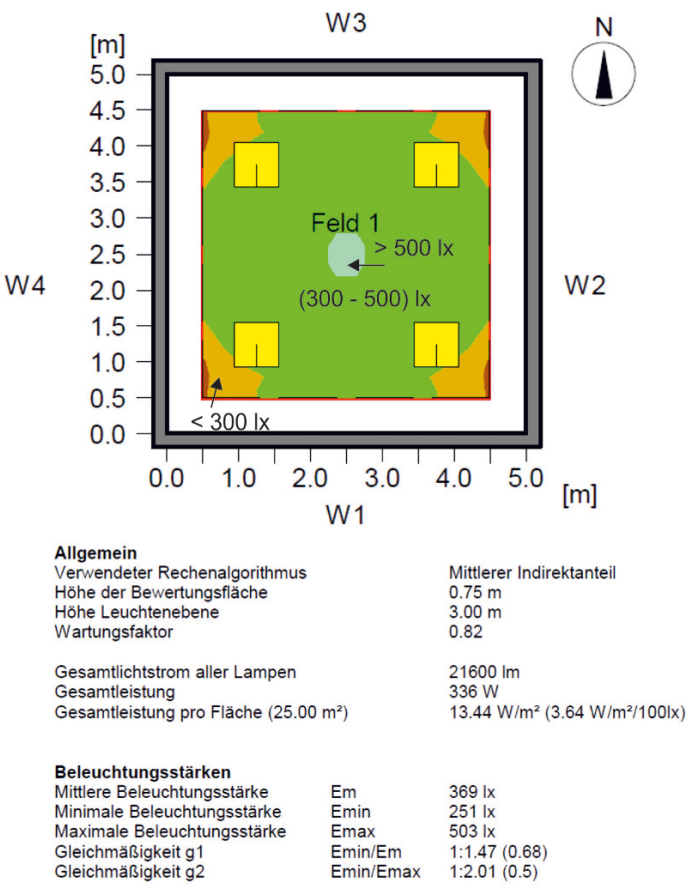


Bild 25.9: Ergebnisübersicht

25.13 Einführung in die LED Beleuchtung

Eine Leuchtdiode (Light Emitting Diode-LED) ist ein elektronisches Halbleiterbauelement. Wird Strom in Durchflussrichtung durch die Diode geleitet, dann emittiert sie Licht in einer oder mehreren Wellenlängen. Sie gehört somit zu den sogenannten Elektrolumineszenzstrahlern.

LEDs (LED = Licht emittierende Diode) produzieren Licht. LEDs sind kleine Elektronikchips, die aus aneinandergrenzenden Halbleiterschichten (z.B. Galliumnitrid und Indiumnitrid) bestehen. Mit LEDs kann jede Lichtfarbe erzeugt werden. Das Halbleitermaterial bestimmt die dominante Wellenlänge und damit die Farbe des emittierten Lichts.

Bild 25.10 zeigt das Farbspektrum von Licht, das sich in seine einzelnen Farbbestandteile zerlegen lässt.

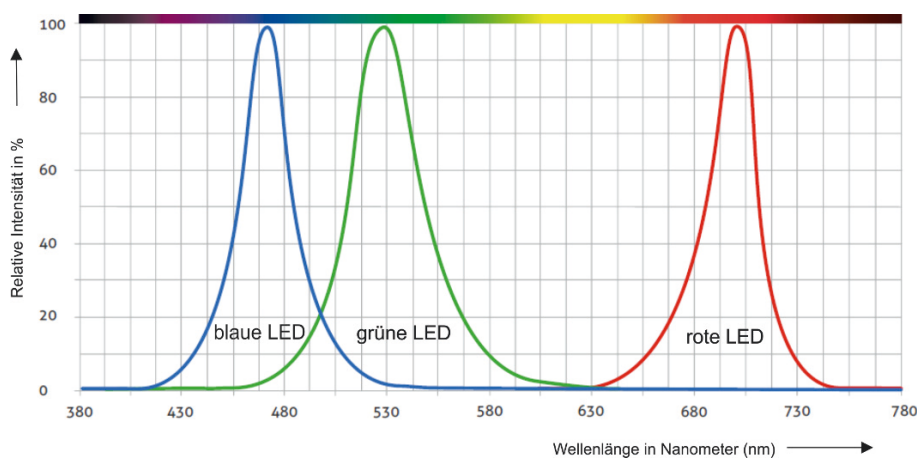


Bild 25.10: Spektren farbiger LEDs

Verschiedene Lampentypen sind in (**Tabelle 25.7**) verglichen.

Tabelle 25.7: Lichtquellen im Vergleich

Kriterien	Glühlampe	Halogenlampe	Energie-sparlampe	LED
Lichtstrom in lm	700	700	880	806
Leistung in W	60	46	15	9,5
Effizienz in lm/W	11,7	15,2	58,7	84,9
Lebensdauer in h	1.000	2.000	15.000	25.000

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind die Investitionskosten und die Betriebszeit ganz entscheidend. Eine Umrüstung und die damit verbundenen Investitionen muss für jedes Projekt individuell durchgeplant werden, um die Amortisationszeit herausfinden zu können. Eine Berechnung kann allerdings nur dann durchgeführt werden, wenn man bei der Betrachtung vor- und Nachteile der LED-Technik berücksichtigt.

Vorteile der LED-Technik:

- Niedriger Energieverbrauch
- Hohe Effizienz, besonders hohe Lichtausbeute
- Lange Lebensdauer von bis zu 50.000 Stunden, benötigen keine Anlaufzeit
- Stufenlose Dimmbarkeit in Kombination mit einem EVG
- Kleinste Abmessungen
- Hohe Schaltfestigkeit
- Sofortiges Licht beim Einschalten
- Großer Betriebstemperaturbereich
- Hohe Stoß- und Vibrationsfestigkeit
- Keine UV- oder IR-Strahlung
- Hohe Farbsättigung ohne Filterung
- Quecksilberfrei.

Nachteile der LED-Technik:

- Effizienz und Lichtfarbe ist mehr oder weniger temperaturabhängig
- Farbwiedergabe ist bei einigen LED-Lampen nicht optimal.
- Anschaffungskosten für LED-Lampen sind noch recht hoch.
- Einige Lampenmodelle weisen immer noch Verluste der Leuchtkraft auf.

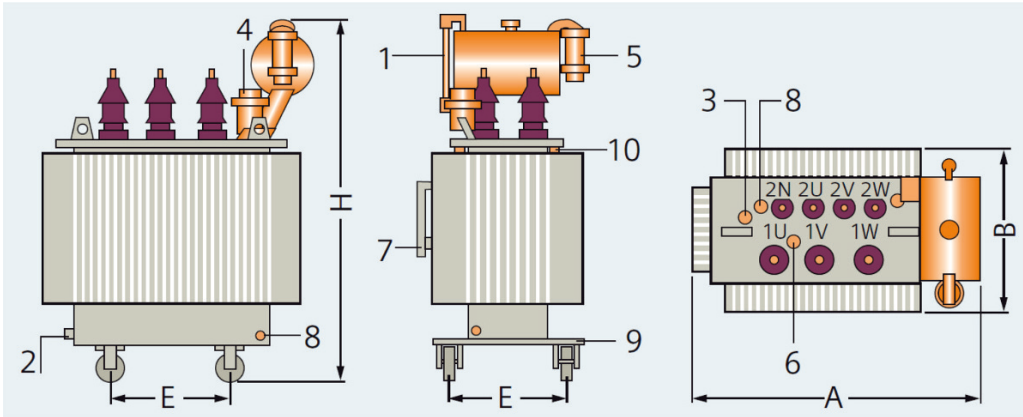


Bild 26.2: Dehngeäß-Ölverteilungstransformator [2], 1 Ölstandanzeiger, 2 Ölablassvorrichtung, 3 Thermometertasche, 4 Buchholzrelais (auf Bestellung), 5 Luftentfeuchter (auf Bestellung), 6 Einstellvorrichtung für Umsteller, 7 Leistungsschild (umsetzbar), 8 Erdungen, 9 Zugöse Ø 30 mm, 10 Zurröse, A = Länge, B = Breite, H = Höhe, E = Rollenmittenabstand

Gießharz-Verteilstransformatoren kommen dort zum Einsatz, wo höchste Sicherheit (Personenschutz, Gewässerschutz, Brandschutz- und Funktionserhalt) gefordert wird.

Gießharztransformatoren entsprechen den in DIN EN 60076-11 definierten Anforderungen C2 (Klimaklasse), E1 oder E2 (Umgebungsclass) und F1 (Brandklasse) (**Bild 26.3**).

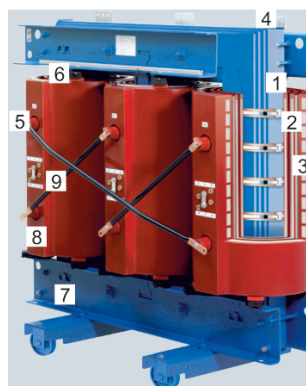


Bild 26.3: GEA FOL-Gießharztransformatoren [2] 1 Dreischenkelnkern, 2 US-Wicklung, 3 OS-Wicklung, 4 US-Anschlüsse, 5 OS-Anschlüsse, 6 Spulen Support System, 7 Pressrahmen und Fahrgestell, 8 Isolierung aus Epoxidharz/Quarzmehl-Mischung, 9 Schaltrohre

Die Bemessungsgrößen eines Transformators sind beispielhaft in **Tabelle 26.1** aufgeführt:

Tabelle 26.1: Bemessungsgrößen eines Transformators

Bemessungsspannung HV	20 kV
Bemessungsspannung LV	0,4 kV
Übersetzung	50
Anzapfung	$\pm 2,5\%$
Bemessungsleistung	630 kVA
Schaltgruppe	Dyn5
Kurzschlussspannung	6%
Leerlaufverluste	860 W
Kurzschlussverluste	6500 W

26.1.2 Belüftung von Tranformatoren

Beim Betrieb eines jeden Transformators entsteht Verlustwärme. Sie muss aus dem Transformatorraum abgeführt werden. Vorrangig zu prüfen ist hierbei die Möglichkeit einer natürlichen (ohne Ventilator) Be- und Entlüftung [2]. Falls diese nicht ausreicht, ist der Einbau einer mechanischen Lüftungsanlage (zwangsläufig) geboten (**Bild 26.4**).

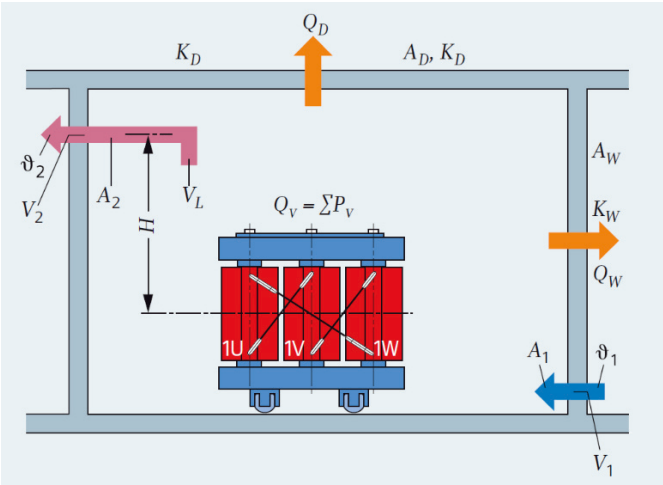


Bild 26.4: Belüftung von Tranformatoren [2]

Es bedeuten:

P_v	Transformator-Verlustleistung in kW
Q_v	abgeführte Verluste in kW
$Q_{W,D}$	abgeführte Verluste durch Wände und Decke in kW
$A_{W,D}$	Fläche von Wänden und Decke in m ²
$K_{W,D}$	Wärmedurchgangszahl in kW/m ² K
S_{AF}	Leistung bei Kühlungsart AF (mit angebauten Lüftern) in kVA
S_{AN}	Leistung bei Kühlungsart AN (selbstkühlend) in kVA
V_L	Luftmenge in m ³ /s, m ³ /h
Q_{v1}	Anteil im natürlichen Luftstrom in kW
Q_{v2}	Anteil durch Wände und Decke in kW
Q_{v3}	Anteil im erzwungenen Luftstrom in kW

Die Verlustwärme von Transformatoren muss abgeführt werden. Dafür sind Zuluft- und Abluftöffnungen vorzusehen. Die Zuluft soll in Bodennähe unter dem Transformator einströmen und die Abluft nach oben abgeführt werden. Die Größe der Abluftöffnung beträgt ohne Gitter bei einer Raumlufterwärmung von 15 K:

$$A = \frac{P_v}{5,8 \sqrt{h}} \quad [kW / m^2] \quad (26.1)$$

$$P_v = P_0 + k P_{k75} \quad [kW] \quad (26.2)$$

Es bedeuten:

A	Zu- bzw. Abluftöffnung
P_v	Transformator-Verlustleistung
$k = 1,06$	für Öltransformatoren
$k = 1,2$	für Gießharztransformatoren
P_0	Leerlaufverluste
P_{k75}	Kurzschlussverluste bei 75°C in kW
h	Höhenunterschied in m

26.2 Schaltanlagenräume

26.2.1 Druckentwicklung in Schaltanlagenräumen

Im Fall einer Störung innerhalb einer gasisolierten Schaltanlage kann ein Störlichtbogen entstehen, der das umgebende Gas sehr stark erwärmt, was zu einem extremen Druckanstieg führt [2]. Die Größe des Druckanstiegs ist abhängig von der

Raumgeometrie, von Entlastungsöffnungen sowie von der Störlichtbogenenergie. Die Folgen eines solchen (seltenen) Fehlers können sowohl für das Bedienungspersonal als auch für den Raum äußerst schwerwiegend sein. Deshalb müssen entsprechende Maßnahmen zur Druckentlastung vorgesehen werden wie z. B. Druckentlastungsöffnungen, -kanäle, Absorber oder Kühler (**Bild 26.5**).

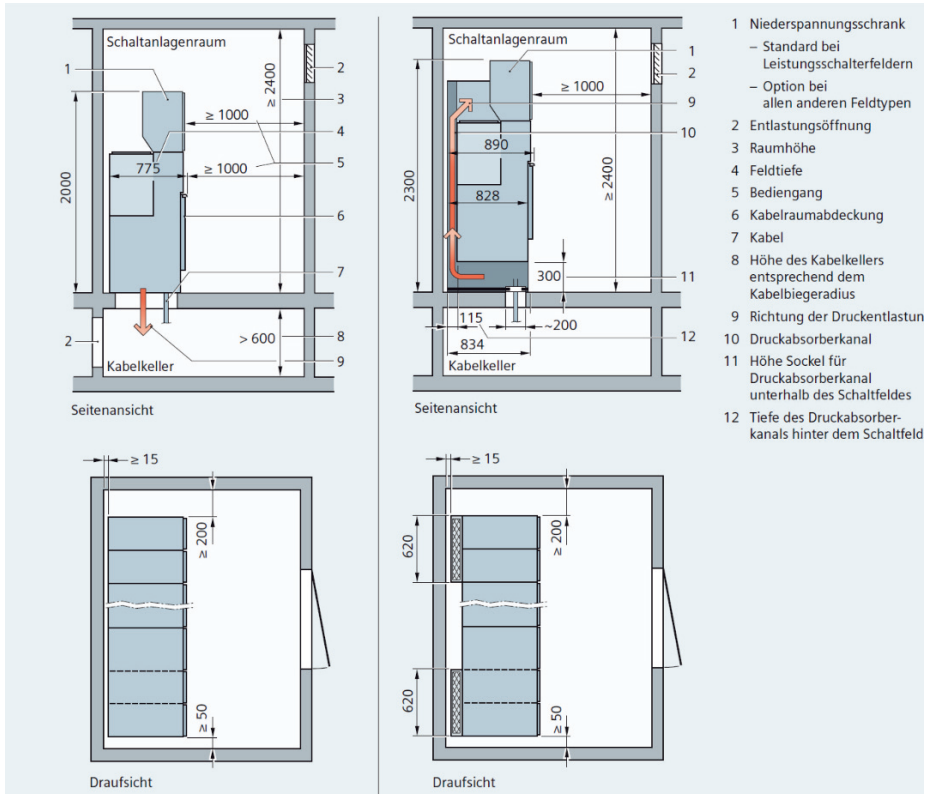


Bild 26.5: Ausführung der MS-Schaltanlage [2]

26.2.2 Anordnung von Schaltfeldern

Nach DIN VDE 0101 ist Folgendes zu beachten (**Bild 26.6**):

1. Betriebs- und Instandhaltungsbereiche sind Korridore, Gänge, Zufahrtsbereiche, Transport- und Fluchtwege.
2. Gänge und Zufahrtsbereiche müssen für Arbeiten, Bedienung und Transport ausreichend bemessen sein.
3. Gänge müssen mindestens 800 mm breit sein.

4. Die Breite der Gänge darf nicht durch in die Gänge hineinragende Betriebsmittel eingeschränkt sein, z. B. ständig vorhandene Antriebe oder Schaltwagen in Trennstellung.
5. Die Fluchtbreite muss mindestens 500 mm betragen, auch wenn entfernbare Teile oder in Endstellung geöffnete Türen in den Fluchtweg hineinragen.
6. Es ist darauf zu achten, dass die Türen von Schaltzellen oder Schaltfeldern in Fluchtrichtung schließen.
7. Für Montage- und Instandhaltungsgänge hinter gekapselten Anlagen (Freiaufstellung) genügt eine Breite von 500 mm.
8. Unter Decken, Abdeckungen oder Umhüllungen, ausgenommen Kabelkeller, ist eine Mindesthöhe von 2000 mm erforderlich.
9. Ausgänge müssen so angeordnet sein, dass die Länge des Fluchtwegs innerhalb des Raums 40 m für Bemessungsspannungen über 52 kV und 20 m für Bemessungsspannungen bis 52 kV nicht überschreitet. Dies gilt nicht für begehbare Sammelschienenkanäle oder Kabelkanäle.
10. Wenn Bedienungsgänge eine Länge von 10 m nicht überschreiten, genügt ein Ausgang. Wenn der Fluchtweg 10 m überschreitet, ist an beiden Enden ein Ausgang oder Notausgang notwendig.
11. Fest eingebaute Leitern oder ähnliche Einrichtungen sind als Notausgänge in Fluchtwegen zulässig.

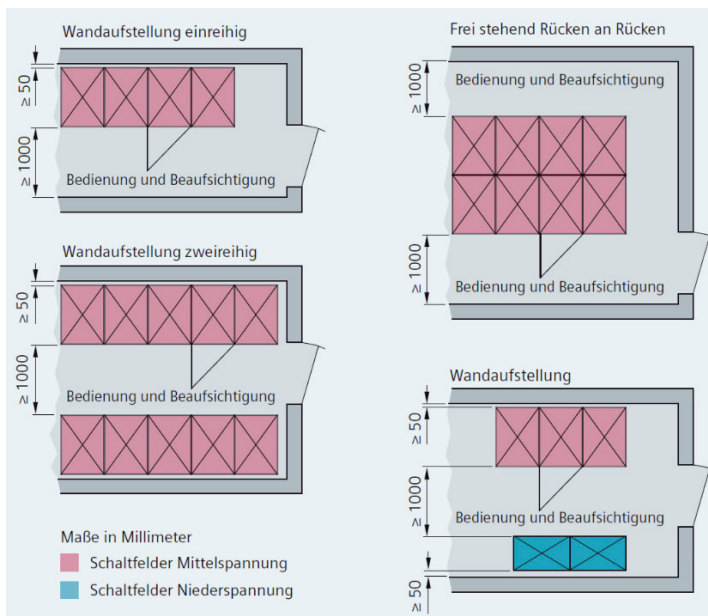


Bild 26.6: Anordnung von Schaltfeldern [2]

Für die Projektierung eines Transformators sind die Bemessungsgrößen eines 630-kVA-GEAFOL Gießharztransformators beispielhaft in **Tabelle 26.3** angegeben.

Tabelle 26.2: Bemessungsgrößen eines GEAFOL Gießharztransformators

Bemessungsleistung S_{rT}	630 kVA
Primär-Bemessungsspannung U_{rHV}	20 kV
Sekundär-Bemessungsspannung U_{rLV}	0,4
Kurzschlussspannung u_{kr}	6%
Leerlaufverluste P_0	1250 W
Kurzschlussverluste P_{k120}	6800 W
Verlustleistung P_v	8730 W
Erforderliche Luftmenge	27 m ³ /min
Schallleistungspegel L_{WA}	62 dB
Gesamtgewicht	1900 kg
Länge (A)	1600 mm
Breite (B)	865 mm
Höhe (H)	1385 mm
Rollenmittenabstand (E)	670 mm

Tabelle 26.3: Bemessungsgrößen eines Öltransformators

Bemessungsleistung S_{rT}	630 kVA
Übersetzung	20000 V $\mp$ 2x2,5% / 400 V
Kurzschlussspannung u_{kr}	4%
Leerlaufverluste P_0	860 W
Kurzschlussverluste P_{k120}	6500 W
Gesamtmassen (Öl+Gewicht)	1715 kg
Geräusche L_{WA}	60 dB
Länge (L)	1220 mm
Breite (B)	900 mm
Höhe (H)	1605 mm

Für die Projektierung von MS-Schaltanlagen kann **Tabelle 26.4** nützlich sein:

Tabelle 26.4: Checkliste für MS-Schaltanlagen

Mittelspannungs-Schaltanlagen	
Aufstellungsort/-höhe (über NN)	
Raum- / Türmaße	
Aufstellungsart	
Bemessungsspannung	
Betriebsspannung	
Bemessungs-Betriebsstrom der Sammelschiene	
Bemessungs-Kurzzeitstrom (1 s)	
Störlichtbogenqualifikation	
Art der Druckentlastung	
Niederspannungsschrank	
Anlage Feldanzahl erweiterbar	
Wartungsfreie Anlage	
Netzparameter	
Betriebsspannung	
Bemessungs-Kurzzeitstrom	
Sternpunktbehandlung	
Kabel-/Freileitungsnetz	
Überspannungsschutz	
Energiequalität	
Netzschutz	

26.3 Niederspannungsanlagen

Die Niederspannungsanlagen werden bis 1 kV gebaut und sind in der Industrie, Hochhäusern, Wohnungen, Bürogebäuden, Motor Control Centern, Klima- und Heizungsanlagen zu finden. Die Einspeisung erfolgt aus dem 20 kV- oder 10 kV-Netz. Die Bemessungsspannung beträgt 400 V/230 V, 50 Hz (**Bild 26.7**). Die Wohnungen werden bis 63 A mit Installationsverteilern in der Wand und darüber hinaus mit Standverteilern bestückt.

Die Schaltanlagen bestehen aus einer Vielzahl verschiedener Betriebsmittel und Komponenten. Wenn all diese Komponenten für ihre Aufgabe unter allen möglichen Betriebsbedingungen ausreichend bemessen sind, ist ein wirtschaftlicher und ungestörter Betrieb zu erwarten. Für die Planung des Versorgungsnetzes ist die Netzgestaltung gründlich zu überlegen, damit die Vorschriften und Anforderungen erfüllt werden.

Für die Niederspannungsschaltanlagen sind folgende Anforderungen zu beachten:

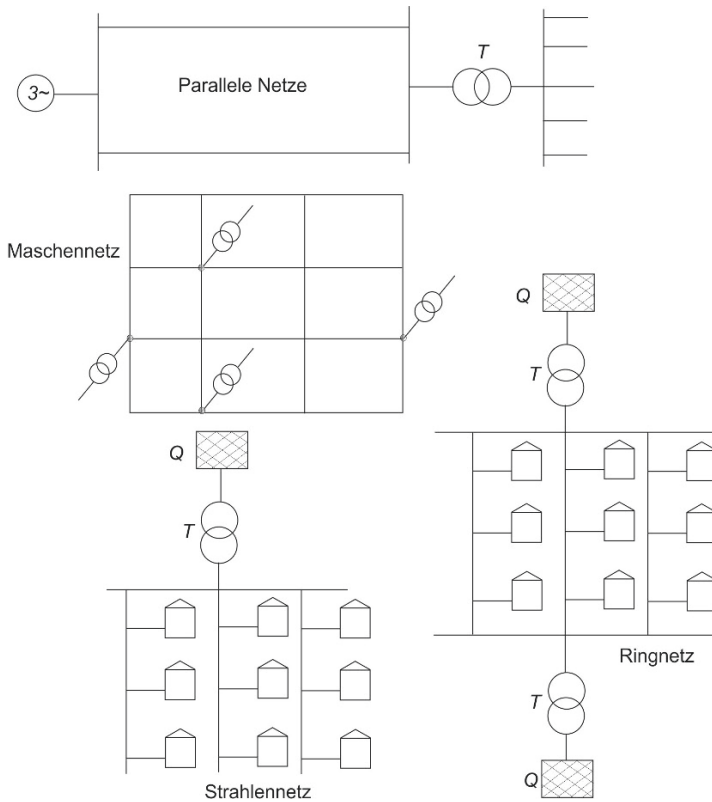


Bild 26.7: Anschlussbeispiele für NS-Anlagen

- Das Netz soll möglichst einfach und übersichtlich aufgebaut sein.
- Für die eingebauten Geräte muss ein optimaler Schutz vorhanden sein.
- Gute Versorgungssicherheit und geringe Netzverluste sind zu gewährleisten.
- Das Netz muss bedienungs- und wartungsfreundlich sein.
- Das Netz muss gute Versorgungsqualität und geringen Oberschwingungsgehalt aufweisen.
- Das Netz ist möglichst in Strahlenform zu gestalten.
- Projektbezogene Vorschriften sind zu beachten.

26.3.1 Verteileraufbau von NS-Schaltanlagen

Bei der Planung einer Niederspannungs-Schaltanlage sind das Wissen über die Bedingungen am Einsatzort, die Schaltaufgabe und die Anforderungen an die Verfügbarkeit Voraussetzungen für eine wirtschaftliche Dimensionierung. Da bei der Planung von Energieverteilungen im Zweckbau keine größeren Schalthäufig-

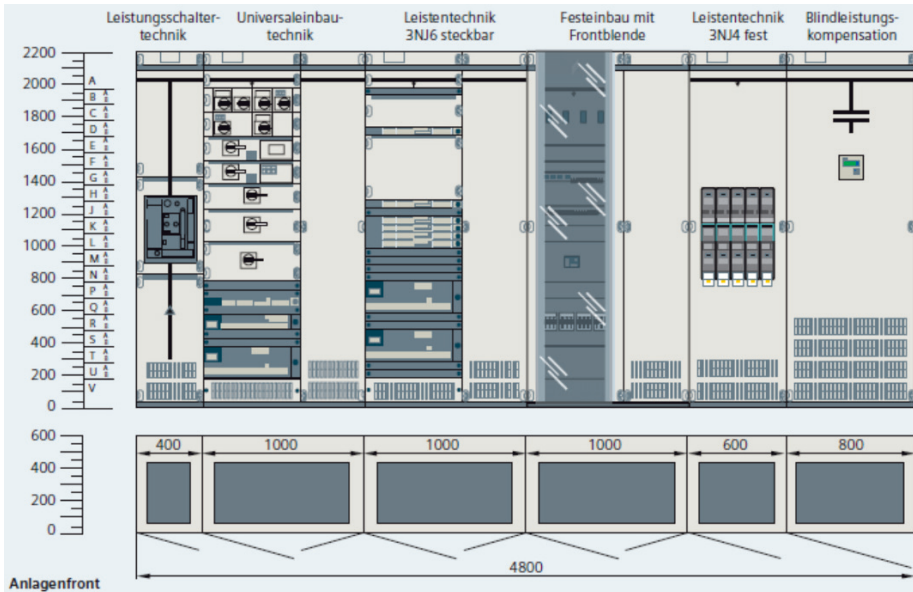


Bild 26.8: Beispiel einer Niederspannungsschaltanlage [2]

keiten berücksichtigt werden müssen und keine größeren Erweiterungen zu erwarten sind, kann leistungsoptimierte Technik mit hoher Einbaudichte eingesetzt werden (**Bild 26.8**).

Hier wird überwiegend sicherungsbehaftete Technik in Festeinbau eingesetzt. Bei einer Energieverteilung bzw. einem Motor-Control-Center für eine Produktionsanlage hingegen sind Austauschbarkeit und Versorgungssicherheit die wichtigsten Kriterien, um Stillstandszeiten so kurz wie möglich zu halten.

Der Einsatz von Einschubtechnik in sowohl sicherungsloser als auch sicherungsbehafteter Technik ist hierbei eine wichtige Grundlage. Das Verhindern von Personen- und Anlagenschäden muss jedoch bei allen Ausführungen an erster Stelle stehen.

Bei der Auswahl der richtigen Schaltanlage ist daher darauf zu achten, dass eine bauartgeprüfte Schaltanlage (Bauartnachweis durch Prüfung nach DIN EN 61439-1/-2 (DIN VDE 0660-600-1/-2) mit der erweiterten Prüfung bezüglich des Verhaltens im Störlichtbogenfall (DIN EN 60439-1 Beiblatt 2, VDE 0660- 500, Beiblatt 2) eingesetzt wird.

Die Auswahl der Schalt- und Schutzgeräte muss immer unter dem Aspekt der einzuhaltenden Vorschriften bezüglich der Anforderungen an das gesamte Netz (Vollselektivität, Teilselektivität) erfolgen. Bei der Aufstellung von Niederspannungsschaltanlagen sind vom Hersteller vorgegebene Mindestabstände (**Bild 26.9**) von Schaltanlagen zu Hindernissen zu beachten. Mindestabmessungen von Bedien-

und Wartungsgängen sind nach DIN VDE 0100-729 (IEC 60364-7-729) bei der Planung zum Platzbedarf zu berücksichtigen.

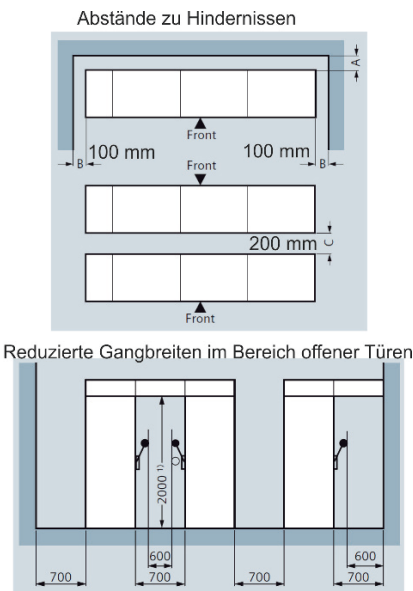


Bild 26.9: Platzbedarf von Schaltanlagen [2]

26.3.2 Checkliste für NS-Schaltanlagen

Für die Projektierung von NS-Schaltanlagen kann **Tabelle 26.5** nützlich sein.

Tabelle 26.5: Checkliste für NS-Schaltanlagen

Niederspannungs-Schaltanlage	
Aufstellort/-höhe	
Aufstellungsart	
Umgebungsbedingungen	
Schutzart	
Umgebungstemperatur	
Netz-/Einspeisedaten	
Netzform	
Anzahl Transformatoren	
Transformatorleistung	
Bemessungskurzschlussspannung	
Bemessungsbetriebsspannung	
Bemessungsfrequenz	
Bemessungsstrom Einspeisung	
Sammelschienensystem	
Bemessungsstrom der Hauptsammelschiene	
Bemessungskurzzeitstromfestigkeit	
der Hauptsammelschiene AV-/SV-Teil	
Querschnitt PEN/N-Leiter	
Normen und Bestimmungen	
Bauartgeprüfte Bausteine nach DIN EN 61439-1/-2	
Störllichtbogenschutz DIN EN 60439-1 Beiblatt 2	
Anschlussdaten	
Anschluss Einspeisungen/Abgänge	
Anschlussrichtung an Schaltanlage	
Einbautechniken	
Einspeisungen	
Kupplungen	
Abgänge > 630 A	
Abgänge ≤ 630 A	
Ausführung Abgänge ≤ 630 A	



27 Planung eines Wohngebäudes

27.1 Einleitung

Im Rahmen dieses beispielgebenden Projektes zur Gebäudeplanung soll ein Überblick über die technische Planung und Projektierung eines Wohngebäudes vermittelt werden. Ziel dieser Elektroinstallation ist das Aneignen von umfangreichem Fachwissen, wie z. B. die Anwendung von Normen und Vorschriften, der Aufbau und Berechnung von Niederspannungsnetzen und die Dimensionierung von Schaltanlagen und Verteilern. Des Weiteren kommt bei der Bearbeitung verschiedene Software zum Einsatz, deren Anwendung es zu erlernen gilt.

27.2 Wohnsituation

Es handelt sich bei dem zu bearbeitenden Gebäude um ein Zwei- oder Mehrfamilienhaus mit einer Gesamtfläche von 370 m^2 . Das Gebäude teilt sich in zwei identische Wohnungen im EG und 1. OG mit je 125 m^2 Wohnfläche und einen Keller mit 120 m^2 auf. Außerdem ist ein gemeinsamer Garten mit 250 m^2 Fläche vorhanden. Es wird angenommen, dass das 1. OG auch das Dachgeschoss des Gebäudes ist, jedoch von der Geometrie dem EG gleicht, es also nicht durch Dachschrägen beeinträchtigt wird. Der Haupteingang befindet sich in einem Zwischengeschoss zwischen Keller und EG im Treppenhaus. Der Keller wird von beiden Parteien benutzt. Hier befinden sich der Haustechnikraum, ein gemeinsamer Saunaraum und für jede Familie eine Abstellkammer und Waschküche.

27.3 Einspeisung

Für die Energieversorgung liegt ein TN-C-S-System vor. Der Neutral- und Schutzleiter sind sowohl separat als auch kombiniert in der Anlage verlegt. Bis zum Hausanschlusskasten und Hauptverteiler sind Neutral- und Schutzleiter zum PEN-Leiter zusammengefasst. Von dort aus zu den Unterverteilern hin liegen sie separat vor (TN-S- System).

27.4 Übersicht des Verteilungssystems

Über die Hausanschlussleitung wird der Hausanschluss am Hausanschlusskasten im Haustechnikraum vorgenommen. Von dort aus führt eine Leitung zum Zählerplatz, der sich direkt neben dem Hausanschlusskasten befindet. Dieser dient als Zählerverteiler, von dort aus gehen Leitungen zu den Unterverteilern. Diese befinden sich im Keller und den beiden Wohnungen. Die Unterverteiler dienen als Stromkreisverteiler. Das einpolige Blockschaltbild ist im **Bild 27.1** zusammenfassend dargestellt.

27.5 Hausanschluss

Die Planung von Hausanschlussräumen und die notwendigen Betriebseinrichtungen sind mit dem zuständigen Netzbetreiber möglichst früh abzustimmen. Als Hausanschlussleitung ($\text{Cu } 4 \times 35 \text{ mm}^2$) liegt ein Erdkabelanschluss vor. Das Erdkabel liegt in 60 cm Tiefe unter Gelände in einem wasserdichten Schutzrohr und endet im Hausanschlussraum (Haustechnikraum), nahe der Querwand zum Treppenhhaus. Der Hausanschluss ist im Haustechnikraum untergebracht, der den Hausanschlussraum bildet. DIN 18012 ist gewährleistet. Die erforderlichen Mindestmaße für den Hausanschlussraum werden erfüllt. Im Haustechnikraum befindet sich auch der Hausanschlusskasten, er ist an der Wand zum Treppenhhaus auf Putz montiert. Seine Hausanschluss Sicherungen stellen eine klare Trennung zwischen dem Netz und der Hausinstallation dar. Zum sicheren Arbeiten und Bedienen ist ein Freiraum von 1,20 m Tiefe hier gewährleistet.

27.6 Zählerplätze und Räume

Bei dieser Anlage hat man sich für eine zentrale Zähleranordnung entschieden. Alle Zähler werden an einem Zählerplatz untergebracht. Von dort aus gehen Ver-

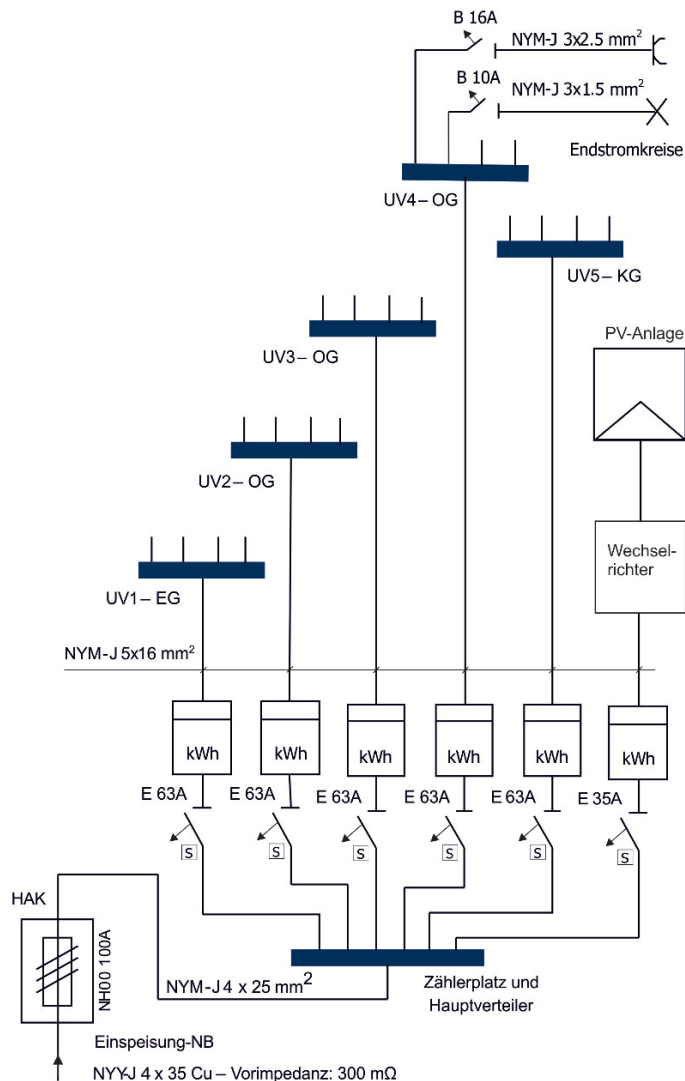


Bild 27.1: Blockschaltbild

bindungsleitungen zu den Unterverteilern. Der Zählerschrank wird nach den Technischen Anschlussbedingungen (TAB) des NB neben dem Hausanschlusskasten im Hausanschlussraum untergebracht. Diese Anordnung hat den Vorteil, dass der Spannungsfall zwischen Hausanschlusskasten und Hauptverteiler sehr gering ausfällt. Der Zählerschrank ist für 4 Zähler auszulegen. Für jede Wohnung wird je ein Zähler für den Unterverteiler vorgesehen, ein weiterer Zähler wird für die gemeinsam genutzten Räumlichkeiten benötigt und ein Zähler dient der Abrechnung der geplanten Photovoltaikanlage. Daraus ergibt sich eine Zählerschrankgröße von 1350 mm Höhe, 750 mm Breite und 160 mm Tiefe. Der Abstand vom

Fußboden bis zur Mitte der Messeinrichtungen darf nicht weniger als 0,8 m und nicht mehr als 1,8 m betragen. Für die Montage der Zählerplätze gelten die TAB der NB, insbesondere müssen DIN 43870, DIN 18012 und DIN 18013 eingehalten werden.

Die Anwendungsregel VDE-AR-N 4101:2011-8 für Zählerplätze in elektrischen Anlagen im Niederspannungsnetz beschreibt Art und Umfang der Mindestanforderungen an Zählerplätze einschliesslich Erzeugungsanlagen. Die Anwendungsregel ersetzt das Kapitel 7, „Mess- und Steuereinrichtungen, Zählerplätze“ und das Kapitel 9 „Steuerung und Datenübertragung“ durch das Kapitel 4.7 „Kommunikationseinrichtungen“ der Anwendungsregel. Damit ist der Zählerplatz für Smart Grid und Smart Metering-Anwendungen vorgegeben. **Bild 27.2** zeigt ein Beispiel für eine zukunftsichere Energieverteilung im Wohnbau mit Anschlussgeräten.

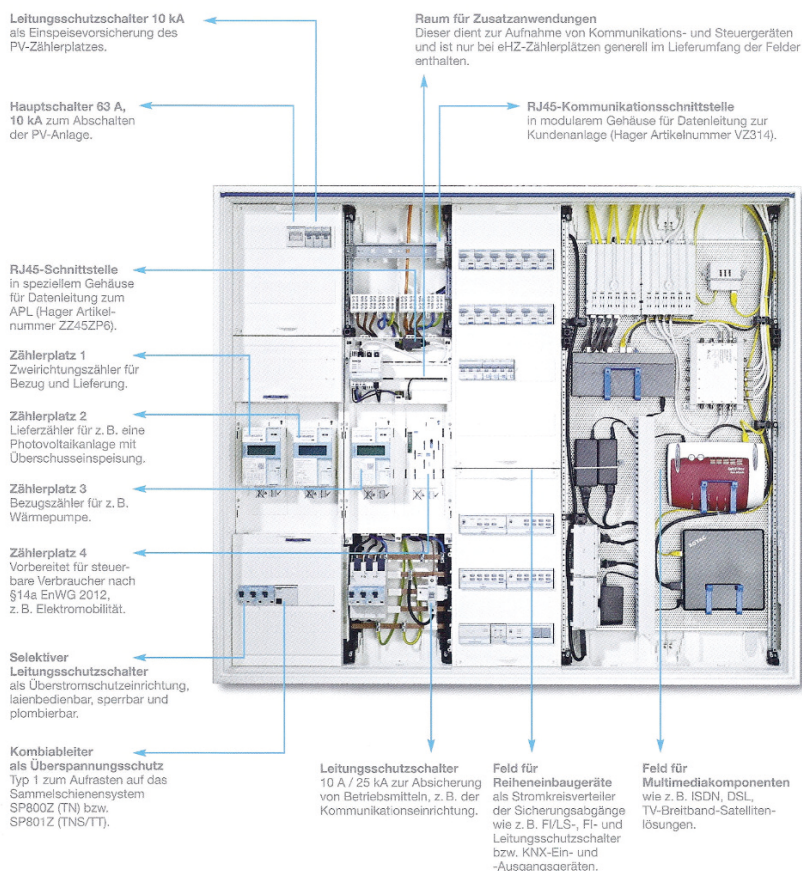


Bild 27.2: Kommunikationsanlagen in Gebäuden [119]

Nischen für den Wandeinbau von Zählerplätzen werden in DIN 18013 erklärt.

Sie gibt die Bezeichnung von Zählernischen und Anforderungen wie die Größe, Tiefe, Mindestbrandschutz und Standfestigkeit der Wände mit Zählernischen und Leitungsführungen an.

27.7 Unterverteiler

Die Unterverteiler werden in Verteilerschränken laut TAB innerhalb der Wohnungen und im Keller untergebracht. Sie sollten möglichst im Belastungsschwerpunkt der Wohnungen liegen, deshalb haben wir uns für eine Platzierung in den Fluren der Wohnungen und dem Flur des Kellers entschieden. Es werden in diesem Projekt Unterputzverteiler mit Tür verwendet, die dem Ausstattungswert 3 entsprechen, also 4-reihige Verteilerschränke. Es ist darauf zu achten, dass mindestens 20% Reserveplätze vorhanden bleiben und der Einbau nach DIN 43871 erfolgt.

27.8 Stromkreisverteilung

Für Beleuchtung und Steckdosen sind getrennte Stromkreise vorgesehen. Dies hat den Vorteil, dass den Geräten die volle Leistung zu Verfügung steht und bei einem Kurzschluss an einem Gerät nicht auch das Licht in dem betreffenden Raum erlischt. Es darf eine maximal Leistung von 368 W, im Dauerbetrieb 2000 W, nicht überschritten werden. Deshalb sollten maximal 7 Steckdosen pro Stromkreis vorgesehen werden und außerdem Großgeräte mit einer Leistung von über 2000 W einen eigenen Stromkreis erhalten. Eine genaue Planung der Stromkreise ist erst nach dem Erstellen des Raumbuches und einer Leistungsbilanz möglich.

27.9 Festlegung des Ausstattungswertes

Um eine möglichst genaue Dimensionierung der Elektroinstallationen des Gebäudes vornehmen zu können ist es notwendig, einen Überblick der Verbraucher im Gebäude aufzustellen. Der Umfang der Ausstattung muss mindestens der DIN 18015-2 entsprechen. Wir haben uns jedoch für den (gehobenen) Ausstattungswert 3 nach RAL-RG 678 entschieden, werden jedoch auch eigene Erfahrungen in die Planung mit einfließen lassen. Dabei legt man großen Wert auf die Flexibilität der Elektroinstallation, um ein möglichst freies Wohnen zu ermöglichen. So wird z.B. für die Küche ein Drehstromanschluss für einen Elektroherd vorgesehen, obwohl wir den Einbau eines Gasherdes planen.

27.10 Kommunikationstechnik

Auch bei der Kommunikationstechnik (Fernsehhempfangssysteme und Telefonanlagen) richten wir uns nach der RAL-RG 678. Hier wenden wir eine Mischung aus Ausstattungswert 2 und Ausstattungswert 3 an. Neben Telefon- und TV-Dosen soll es ein EDV-System in Form eines lokalen Intranets in den Wohnungen geben. Es werden LAN-Kabel in der Wohnung verlegt, zu denen man aus mehreren Räumen Zugriff hat. Ein Router im Flur dient als Verbindungszentrale, auch zum Drahtlos-Netzwerk (WLAN). Als Gegensprechanlage ist ein modernes System mit Videofunktion vorgesehen. Dies bietet dadurch, dass Besucher nicht nur gehört sondern auch gesehen werden können, zusätzliche Sicherheit. Ein Klingeltrafo ist für ein solches System auch nicht mehr notwendig. Die kommunikationstechnische Ausstattung lässt sich aus Tabellen ablesen.

27.11 Brandschutz und Sicherheitstechnik

Als Brandmeldeanlage kommen batteriebetriebene Brandmelder an den Decken der wichtigsten Räume zum Einsatz, eine günstige und einfache, aber dennoch ausreichende Lösung. Weitere Sicherheitstechnik, wie Überfallmeldeanlagen ist nicht vorgesehen.

27.12 Anschlusswerte und Verbraucher-Tabelle

Die Anschlusswerte sind in Form von Tabellen (Raumbuch) vorzubereiten. Die Verbraucher der einzelnen Räume sollen nach Verbraucherart und nach benötigten Anschlussleistungen aufgelistet werden. Einige Erfahrungswerte aus der Praxis sind unten wiedergegeben.

Einfach-Steckdose (EST) - 200 W

Doppel-Steckdose (DST) - 300 W

Lichtanschlüsse (Anschluss) - 100 W

CEE-Drehstrom-Steckdosen für C/16 A- 3 kW

CEE-Drehstrom-Steckdosen für C/32 A- 5 kW

Es ist darauf zu achten, dass die Steckdosen- und Lichtstromkreise zu trennen sind und zwei CEE-Steckdosen über eine RCD angeschlossen werden dürfen.

27.13 Festlegung der Bemessungswerte von Leitungen

In DIN VDE 0100-520 und in DIN VDE 0298-4 sind Angaben und Tabellen zu finden, nach deren die Leiterquerschnitte bemessen werden. Die Grundlage dafür ist, dass man über die Bemessungsleistung den Betriebsstrom berechnet. Dabei sind die Oberschwingungsströme zu beachten, da sonst der Neutralleiter überlastet werden könnte. Es wird empfohlen, dass der Leiterquerschnitt von $1,5 \text{ mm}^2$ mit B10 A und $2,5 \text{ mm}^2$ mit B16 A abgesichert werden, wobei die Verlegearbeiten zu beachten sind. Nach DIN 18015-1 ist es nicht erlaubt, für den ganzen **Wohnbereich** nur eine Haupt-RCD mit einem 30 mA-Differenzstrom einzusetzen. Stattdessen sollten mindestens drei Stück RCD/30 mA oder besser für jeden Stromkreis der kombinierte MCB/RCD vorgesehen werden. Für den Außenbereich sowie für den Keller muss für jeden Stromkreis ein eigener RCD-Stromkreis installiert werden. Dementsprechend sind die Verteiler zu bemessen.

27.14 Erdungsanlagen

Zum Schutz vor gefährlichen Berührungsspannungen zwischen der technischen Anlage und dem Erdreich sowie zum Potentialausgleich wird eine Erdungsanlage nach DIN VDE 0100-Teil 540 geplant. Dazu wird in das Außenfundament des Gebäudes ein Fundamenterder als geschlossener Ring mit $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ gelegt. Er besteht aus verzinktem Bandstahl mit einem Querschnitt von 90 mm^2 und wird zum Schutz vor Korrosion in einer 10 cm hohen Betonschicht eingebettet. Über eine Anschlussfahne wird der Fundamenterder im Haustechnikraum mit der Haupterdungsschiene verbunden. Es ist darauf zu achten, dass weitere Anschlussfahnen rund um das Gebäude für den äußeren Blitzschutz benötigt werden. Die Haupterdungsschiene dient dem Schutzpotentialausgleich. Sie wird mittels Schutzpotentialausgleichsleitung nach DIN EN 62305 (VDE 0185) (**Cu NYM-J 1x 16 mm², ansonsten 10 mm²**) im Hauptverteiler mit dem PEN-Leiter verbunden.

Mit der Haupterdungsschiene werden ebenfalls alle metallischen Leitungssysteme, Heizungsanlage sowie Metallteile der Gebäudekonstruktion verbunden.

27.15 Blitzschutz

Laut Landesbauverordnung (LBO) sind Blitzschutzeinrichtungen für Wohngebäude nicht erforderlich. Der Blitzschutz umfasst Einrichtungen zum Auffangen und

Ableiten des Blitzstromes in die Erdungsanlage. Hierzu werden Fangleitungen (Kupfer 50 mm²) im Maschenverfahren auf dem Dach des Gebäudes möglichst dicht entlang bestehender Kanten montiert und über Ableitungen mittels Anschlussfahnen mit dem Fundamenterder verbunden. Für die Blitzschutzklasse III müssen Abstände zwischen Ableitungen von maximal 15 m und eine Maschenweite von 15 m x 15 m eingehalten werden, siehe auch VdS. Nach den baulichen Gegebenheiten können die gegenseitigen Abstände der Ableitungen unterschiedlich sein. Die Gesamtzahl der erforderlichen Ableitungen ist nach Schutzklasse einzuhalten. In der Norm DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3) werden typische Abstände zwischen Ableitungen und Ringleitern in Abhängigkeit der Schutzklasse genannt.

27.16 Auslegung der Unterverteiler

Die Auslegung der Stromkreise erfolgt nach DIN 18015. Über die angeschlossene Leistung und die Betriebsspannung lässt sich der Betriebsstrom des Stromkreises berechnen. Über diesen werden die passende Sicherungsgröße und der Kabelquerschnitt ermittelt. Um auf der sicheren Seite zu sein, wird jede Steckdose mit 300 W beaufschlagt, jeder Licht-Auslass mit 100 W. Drehstromkreise werden ab den Unterverteilern mit $\cos\varphi = 1$ berechnet. Bei der Auswahl des Kabelquerschnittes ist darauf zu achten, dass an jeder Steckdose theoretisch ein Verbraucher mit 3680 W angeschlossen werden kann. Ab den Unterverteilern wird die Verlegeart B1 verwendet, das heißt, die mehradrigen Leitungen werden in einem Elektroinstallationsrohr in der Wand/Decke/Fußboden verlegt. Erweiterungen und Änderungen des Netzes sind so zu einem späteren Zeitpunkt einfach zu handhaben. Es ist darauf zu achten, die Last auf die Leiter (L1, L2, L3) gleichmäßig zu verteilen und den maximal zulässigen Spannungsfall nach DIN VDE 0100-520 Beiblatt 2 auszulegen.

27.17 Zusätzlicher Schutz durch RCDs

Zusätzlicher Schutz ist durch Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen vorgeschrieben. Zur Unterstützung der bisher angewendeten Schutzmaßnahmen werden die Stromkreise mit Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCDs, engl. für: Residual Current Protective Device) ausgestattet. Die RCDs dienen der schnellen allpoligen Abschaltung von Betriebsmitteln, falls durch Isolationsfehler gefährliche Berührungsspannungen auftreten, dem Schutz gegen direktes Berühren und dem Brandschutz. In allen Räumen bzw. in allen Stromkreisen werden 4-polige RCDs des Typ A mit einem Bemessungsdifferenzstrom von $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$ installiert. Dabei

schützt eine RCD gleichzeitig mehrere Stromkreise, der maximale ausgewählte Betriebsstrom des RCDs von 40 A sollte jedoch nicht überschritten werden. Die Aufteilung der Stromkreise auf die RCDs lässt sich anhand des mit StriePlan erstellten Stromkreisplanes oder dem Verteilerplan (Belegung der Unterverteiler) entnehmen.

27.18 Vergleich der Berechnungen mit Simaris

Wie bereits erwähnt wurden die Berechnungen und Auslegungen von Hand exemplarisch nur für einen Stromkreis durchgeführt. Um zu gewährleisten, dass die geplante Anlage, also auch die restlichen Stromkreise, die benötigten Normen und Bedienungen einhalten, haben wir die Anlage mit der Software Simaris von Siemens berechnet. Die ausgelegte Anlage erfüllt alle von Simaris gestellten Anforderungen, man erkennt jedoch, dass die Ergebnisse um ca. 10 bis 15% von unseren Berechnungen abweichen. Der Grund hierfür ist, dass Simaris zur Berechnung weitaus genauere (deshalb jedoch auch komplexere) Formeln anwendet und auch nicht alle Einstellungen unsere Anlage exakt dem Programm übergeben wurden konnten.

27.19 Ermittlung des Leistungsbedarfs

Die Ausstattung und der Leistungsbedarf des Gebäudes lässt sich aus den folgenden Tabellen ablesen. Für Wohngebäude kann ein Gleichzeitigkeitsfaktor von $g = 0,4$ angenommen werden.

Tabelle 27.1: Kommunikationstechnik (Auszug)

Wohnungen EG und OG					
Raum	Telefon	TV	EDV	GSA	BMA
Küche	-	1	1	-	1
Balkon, Küche	-	1	1	-	-
Wohnzimmer	-	2	1	-	1
Flur	2	-	1	1	1
Schlafzimmer	-	1	1	-	1
Arbeitszimmer	1	1	1	-	1
Kinderzimmer	1	1	1	-	1
Gesamt	4	7	7	1	6
GSA: Gegensprechanlage, BMA: Brandmeldeanlage					

Tabelle 27.2: Stromkreisauslegung (Auszug)

Wohnungen EG und OG									
SKN	Gerät	SD	LI	P kW	BS I_b	ÜSE	S mm ²	l m	Δu %
1	E-Herd			6	8,66	B16 A	5x2,5	6,2	0,31
2	Backofen			3,5	5,05	B16 A	5x2,5	6,2	0,31
3	M-Welle			2,3	10	B16 A	3x2,5	6,2	0,62
4	GS			2,1	9,13	B16 A	3x2,5	6,2	0,62
Summe				35,1					

Tabelle 27.3: Ermittlung des Gesamt-Leistungsbedarfs

Unterverteiler	P_{ins} kW	g	P kW
Wohnung EG	35100	0,4	14010
Wohnung OG	35100	0,4	14040
Keller Wohnung EG	12700	0,4	5080
Keller Wohnung OG	12700	0,4	5080
Gesamt je Wohnung	47800	0,4	19120
Keller Gemeinschaft	22300	0,4	8920
Gesamt Gebäude	117900	0,4	47160

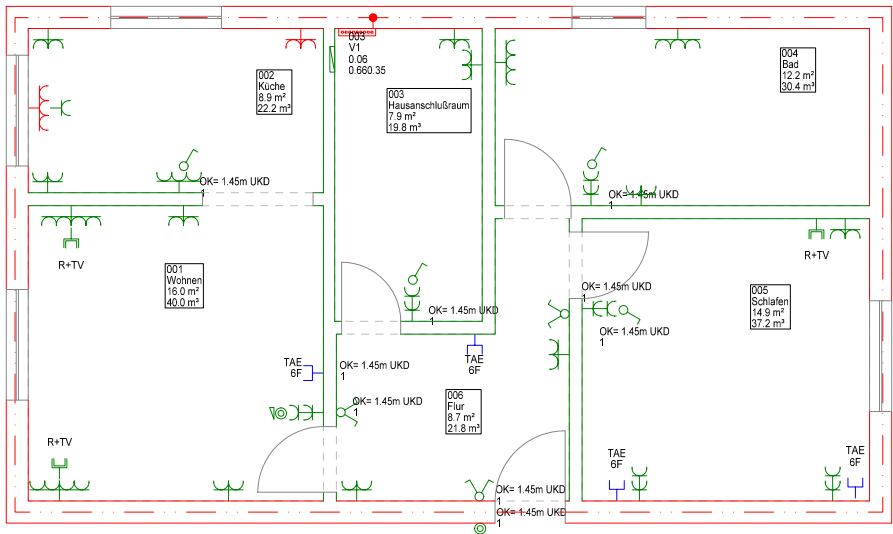


Bild 27.3: Installationsplan

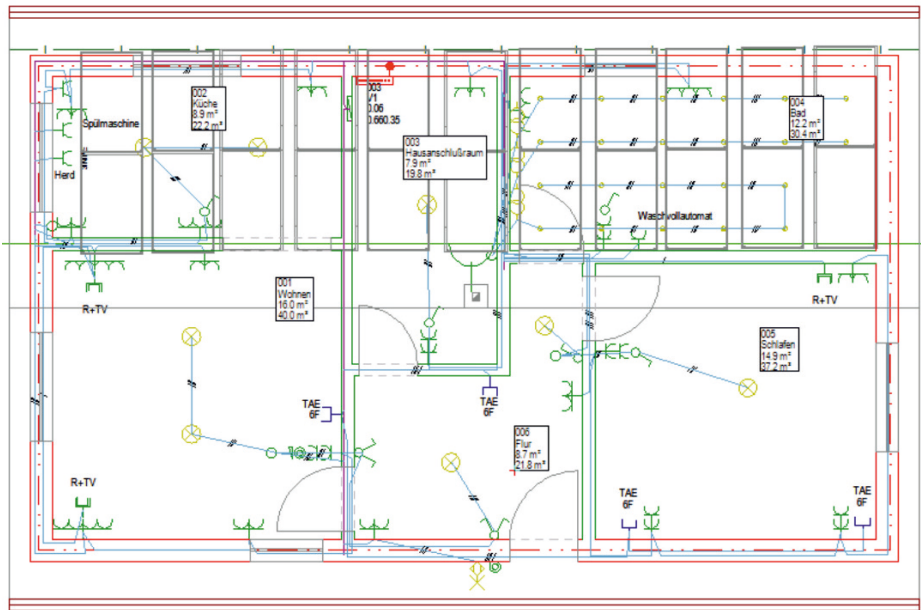


Bild 27.4: Installationsplan



Bild 27.5: Festlegung der Stromkreise

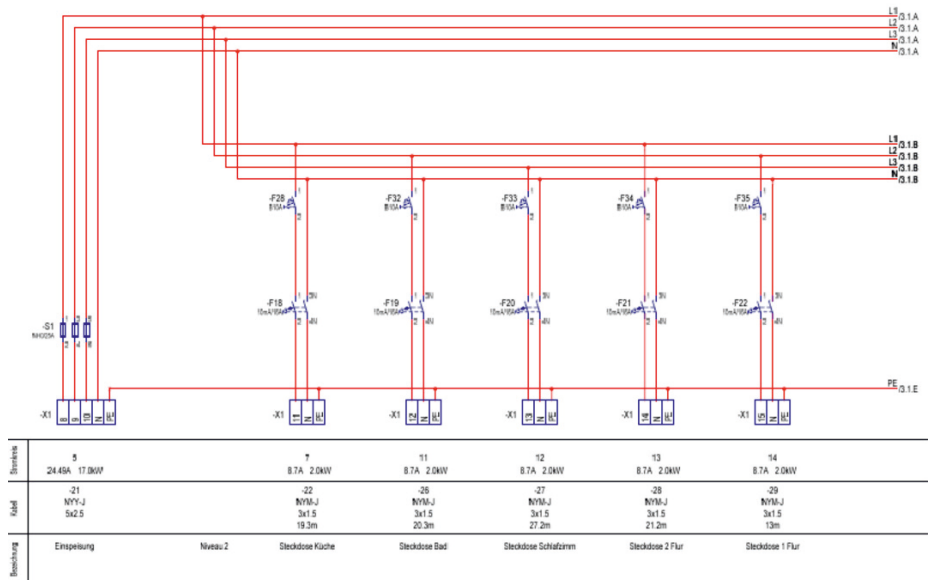


Bild 27.6: Übersichtsschaltplan

27.20 Auslegung der Endstromkreise

Die Verlegeart der Leitung wird B2 gewählt, wobei die mehradrigen Leitungen in einem Elektroinstallationsrohr in der Wand/Decke/Fußboden verlegt werden. Erweiterungen und Änderungen des Netzes sind so zu einem späteren Zeitpunkt einfach zu handhaben. Es ist darauf zu achten die Last auf die drei Leiter (L1, L2, L3) gleichmäßig verteilt wird.

1. Leitungen für Herd, Stromkreis 1:

$$I_B = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi} = \frac{6 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 1} = 8,66 \text{ A}$$

$I_B = 8,66 \text{ A}$, damit beträgt der Bemessungsstrom des Leitungsschutzschalters B 16 A. Der Leitungsquerschnitt ist NYM-J 5 x 2,5 mm².

2. Steckdosenstromkreis, Stromkreis 5:

$$I_B = \frac{P}{U_0 \cdot \cos\varphi} = \frac{6 \cdot 300 \text{ W}}{230 \text{ V} \cdot 1} = 7,83 \text{ A}$$

Damit beträgt der Bemessungsstrom des Leitungsschutzschalters B 16 A. Der Leitungsquerschnitt ist NYM-J 3x 2,5 mm².

27.21 Dimensionierung der Anlage

In diesem Teil werden die Bemessungsströme der Verbraucher und die Querschnitte der Leitungen berechnet und die Überstromschrutzeinrichtungen (ÜSE) ausgewählt.

1. Leitung zwischen HAK und Zählerschrank:

($\cos\varphi=0,80$, Verlegeart C, Bei 25°C Umgebungstemperatur, TN-C-System)

$$I_B = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{47160 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,80} = 85,1 \text{ A}$$

Aus **Tabelle 21.8** ergibt sich:

$I_n = 100 \text{ A}$ und $I_z = 102 \text{ A}$ bei Verwendung von NYM-J 4 x 25 mm² als Leitung.

Für die Sicherung damit: 3x100 A-NH00

2. Leitung zwischen Zählerschrank und dem weitest entfernten Unterverteiler:

($\cos\varphi = 0,80$, Verlegeart B1, Bei 25 °C Umgebungstemperatur, TN-S-System)

$$I_B = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{14040 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,80} = 25,33 \text{ A}$$

Aus **Tabelle 21.8** ergibt sich:

$I_n = 25 \text{ A}$ und $I_z = 30 \text{ A}$ bei Verwendung von NYM-J 5x4 mm² als Leitung. Hauptleitungen in einem TN-S-System werden jedoch laut TAB und DIN VDE 0100-540 mit einem Querschnitt von mindestens $S = 10 \text{ mm}^2$ ausgeführt, somit ergibt sich:

$I_n = 63 \text{ A}$ und $I_z = 66 \text{ A}$ bei Verwendung von NYM-J 5x16 mm² als Leitung. Für den Haupt-Leitungsschutzschalter (SH-Schalter) somit: 3 x E 63 A - Selektiv

27.22 Berechnung des Spannungsfalls

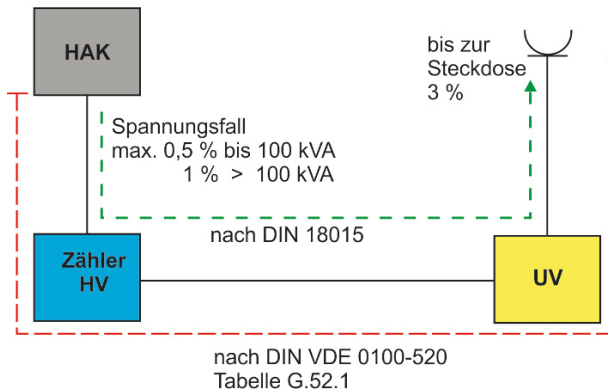


Bild 27.7: Ansicht des Spannungsfalls in Gebäuden, maximal zulässiger Werte

Der Spannungsfall wird exemplarisch für den längsten Stromkreis per Hand berechnet (**Bild 27.7**). Der Spannungsfall für die einzelnen Stromkreise der Unterverteiler lässt sich aus Tabellen im Beiblatt 2 zu DIN VDE 0100-520 ablesen. Die Ergebnisse können dann durch die Berechnung mit Simaris Design verglichen werden. Der längste Stromkreis ist der Steckdosenstromkreis des Schlafzimmers in der Wohnung im Obergeschoss. Es ergeben sich daraus folgende Berechnungen (bei 25 °C Umgebungstemperatur):

1. Leitung zwischen HAK und Zählerschrank:

$l = 2,5 \text{ m}$, $\cos \varphi = 0,80$, $I_n = 100 \text{ A}$, $S = 4 \times 25 \text{ mm}^2$, $U_n = 400/230 \text{ V}$, Kupferleitung

$$\Delta u = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot 100\%}{\kappa \cdot S \cdot U_n}$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot 2,5 \text{ m} \cdot 100 \text{ A} \cdot 0,8 \cdot 100\%}{56 \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} \cdot 25 \text{ mm}^2 \cdot 400 \text{ V}} = 0,06\%$$

Für Anschlussleistungen bis 100 kVA ist laut TAB zwischen NB-Übergabestelle (HAK) und den Messeinrichtungen (Zählerschrank) ein Spannungsfall von maximal 0,5 % zulässig. Wir liegen unter diesem Wert.

2. Spannungsfall zwischen Zählerschrank und Unterverteiler der Wohnung im Obergeschoss (UV 3):

$l = 9 \text{ m}$, $\cos \varphi = 0,80$, $I_n = 63 \text{ A}$, $S = 5 \times 16 \text{ mm}^2$, $U_n = 400/230 \text{ V}$, Kupferleitung

$$\Delta u = \frac{\sqrt{3} \cdot l \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot 100\%}{\kappa \cdot S \cdot U_n}$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot 9 \text{ m} \cdot 63 \text{ A} \cdot 0,8 \cdot 100\%}{56 \frac{\text{m}}{\Omega \text{mm}^2} \cdot 16 \text{ mm}^2 \cdot 400 \text{ V}} = 0,219\%$$

3. Spannungsfall zwischen UV 3 der Wohnung im OG und Stromkreis Nr.13:

($l = 17,2 \text{ m}$, $\cos \varphi = 1$, $I_n = 16 \text{ A}$, $S = 3 \times 2,5 \text{ mm}^2$, $U_n = 230/400 \text{ V}$, Kupferleitung)

$$\Delta u = \frac{2 \cdot l \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot 100\%}{\kappa \cdot S \cdot U_0}$$

$$= \frac{2 \cdot 17,2 \text{ m} \cdot 16 \text{ A} \cdot 1 \cdot 100\%}{56 \frac{\text{m}}{\Omega \text{mm}^2} \cdot 2,5 \text{ mm}^2 \cdot 230 \text{ V}} = 1,71\%$$

4. Summe der prozentualen Spannungsfälle:

$$\Delta u = 0,062\% + 0,219\% + 1,71\% = 2\%$$

Damit liegen wir unter dem Grenzwert von $\Delta u = 5\%$ und halten die Vorschriften ein.

Der Spannungsfall der weiteren Endstromkreise lässt sich aus der Tabelle ablesen. Der Spannungsfall aller Stromkreise liegt im Normbereich.

27.23 Berechnung der Abschaltbedingungen

Es soll nun geprüft werden, ob die Abschaltbedingungen erfüllt werden, dabei wird von einem Zahlenwert von 1,56 für eine Temperaturerhöhung von 20°C auf 160°C ausgegangen. Die Berechnung wird wiederum nur exemplarisch für den Stromkreis durchgeführt.

1. Hauptzuleitung:

Für die (Cu) - Leitung NYM-J 4x25 mm², $l = 2,5$ m ergibt sich aus Tabelle Projektierung von Niederspannungs- und Sicherheitsanlagen ein Reaktanzbelag von $x'_L = 0,086$ mΩ/m.

$$R_L = 1,56 \cdot \frac{2 \cdot l \cdot 1000}{\kappa \cdot S} = 1,56 \cdot \frac{2 \cdot 2,5 \text{ m} \cdot 1000}{56 \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} \cdot 25 \text{ mm}^2} = 5,57 \text{ m}\Omega$$

$$X_L = 2 \cdot l \cdot x'_L = 2 \cdot 2,5 \text{ m} \cdot 0,086 \text{ m}\Omega/\text{m} = 0,43 \text{ m}\Omega$$

$$Z_S = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} = \sqrt{5,57 \text{ m}\Omega^2 + 0,43 \text{ m}\Omega^2} = 5,59 \text{ m}\Omega$$

2. Hauptverteiler (Zählerschrank) bis Unterverteiler Obergeschoss (UV 3):

Für die Berechnung der Impedanz der (Cu)- Leitung NYM-J 5 x 16 mm², $l = 9$ m muss nun nur noch die Reduktanz berücksichtigt werden. Die Reaktanz ist viel kleiner als die Reduktanz und kann daher vernachlässigt werden.

$$Z_S = R_L = 1,56 \cdot \frac{2 \cdot l \cdot 1000}{\kappa \cdot S} = 1,56 \cdot \frac{2 \cdot 9 \text{ m} \cdot 1000}{56 \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} \cdot 16 \text{ mm}^2} = 31,34 \text{ m}\Omega$$

3. Unterverteiler Obergeschoss (UV 3) bis letzte Steckdose des Endstromkreises: Auch bei dieser Leitung (Cu) NYM-J 3x2,5 mm², $l = 17,2$ m, muss die Reaktanz nicht mehr berücksichtigt werden.

$$Z_S = R_L = 1,56 \cdot \frac{2 \cdot l \cdot 1000}{\kappa \cdot S} = 1,56 \cdot \frac{2 \cdot 17,2 \text{ m} \cdot 1000}{56 \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} \cdot 2,5 \text{ mm}^2} = 383,32 \text{ m}\Omega$$

4. Gesamtkurzschlussimpedanz:

Es wird von einer Vorimpedanz des Netzes von $Z_V = 300$ mΩ ausgegangen.

$$Z_G = Z_V + Z_{Anlage} = 300 \text{ m}\Omega + 5,59 \text{ m}\Omega + 31,34 \text{ m}\Omega + 383,32 \text{ m}\Omega = 720,25 \text{ m}\Omega$$

5. Einpoliger Kurzschlussstrom an der Steckdose:

Es wird von einem Spannungsfaktor von $c = 0,9$ bei einer Nennspannung von $U_n = 400$ V ausgegangen.

$$I''_{k1\min} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z} = \frac{0,9 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 0,72 \Omega} = 288,67 \text{ A}$$

Der Abschaltstrom des B 16 A Leistungsschutzschalters beträgt: $I_a = 5 \cdot 16 \text{ A} = 80 \text{ A}$

Es gilt: $I''_{k1\min} > I_a$ und damit $288,67 \text{ A} > 80 \text{ A}$. Die Abschaltbedingung ist daher erfüllt.

Die Abschaltbedingungen für die restlichen Stromkreise wurden mithilfe von Simaris und Excel berechnet und lassen sich aus **Tabel 27.23** ablesen.

Tabelle 27.4: Berechnung der Kurzschlussströme(Auszug)

Wohnungen EG und OG					
SKN	Beschreibung	Querschnitt mm ²	Länge <i>l</i>	Z_s mΩ	I''_{k1min} A
1	E-Herd	5 x 2,5	6,2	138,17	460,74
9	SD-Wohnzimmer	3 x 2,5	9,4	209,49	400,73
14	SD-Heizungsraum	3 x 2,5	7,9	176,06	426,79

27.24 Selektivität

Selektivität:

Eine Anlage mit mehreren in Reihe geschalteten Überstromschutz-Einrichtungen ist selektiv, wenn im Störfall nur die, in Energierichtung gesehen, direkt vor der Störungsstelle liegende Überstrom-Schutzeinrichtung anspricht und allein den Fehler abschaltet. Nichtbetroffene Abzweige werden weiterhin versorgt.

Schaltet zusätzlich zur Überstrom-Schutzeinrichtung im betroffenen Stromkreis auch die Überstrom-Schutzeinrichtung im vorgeordneten Stromkreis ab, wird für weitere vom Fehler nicht betroffene Stromkreise die Spannungsversorgung unterbrochen. In diesem Fall spricht man von nicht selektivem Verhalten.

Back-up-Schutz ist gegeben, wenn im Kurzschlussfall eine nachgeordnete Überstrom-Schutzeinrichtung durch eine vorgeordnete Überstrom-Schutzeinrichtung geschützt wird.

Selektivitätsnachweis wird gefordert nach:

1. DIN VDE 0100 Teil 710: Errichten von Niederspannungsanlagen. Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art.
2. DIN VDE 0100 Teil 718: Starkstromanlagen und Sicherheitsstromversorgung in baulichen Anlagen, für Menschenansammlungen.
3. DIN VDE 0100 Teil 530: Errichten von Niederspannungsanlagen. Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel, Schalt- und Steuergeräte.
4. Anlagen mit hoher Versorgungssicherheit wie Rechenzentren von Versicherungen und Banken, Flughäfen, Produktionsgebäude in der Industrie.

Exemplarisch wird ein Stromkreis anhand der Strom-Zeit-Kennlinien der Schutzeinrichtungen dargestellt und erklärt (**Bild 27.8**). Man sieht, dass im Falle eines Kurzschlusses zuerst der B16-A Leitungsschutzschalter anspricht und damit die

Leitung schützt. Der E63-A SH-Schalter und die NH00-80 A Sicherung bleiben in Funktion und sichern das übrige Netz weiterhin ab. Als nächstes würde nun der E63-A SH-Schalter auslösen und somit die NH00-63-A- Sicherung im Betrieb bleiben, welche erst ganz zum Schluss auslösen würde. Diese Reihenfolge entspricht dem gewünschten selektiven Verhalten der Überstromschutzeinrichtungen.

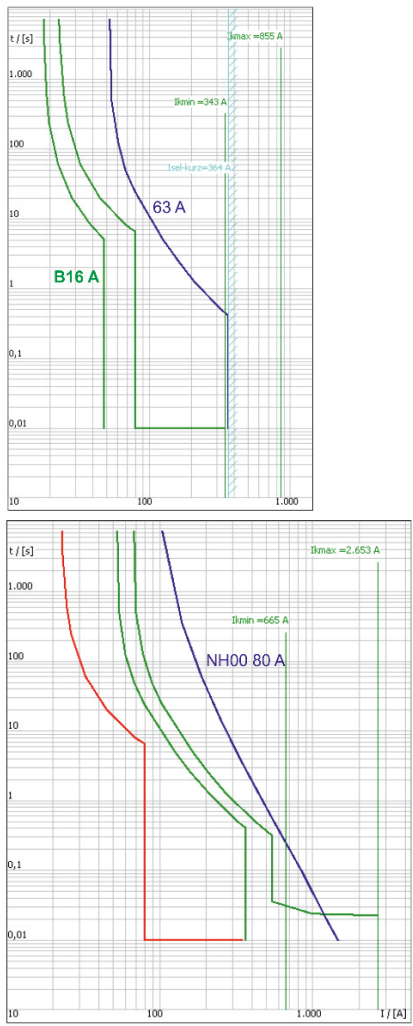


Bild 27.8: Selektivität

Literaturverzeichnis

- [1] Kasikci, I.: Projektierung von Niederspannungsanlagen, 4. Auflage, Heidelberg, Hüthig-Pflaum-Verlag, 2010, ISBN ISBN 978-3-8101-0468-7.
- [2] TIP: Totaly Integrated Power - Planungshandbuch für die elektrische Energieverteilung Band 1: Planungsgrundlagen, Siemens Erlangen: 2018
- [3] Becker, M., Kasikci, I.: Begleitendes skript zur Vorlesung "Grundlagen der Elektrotechnik", Hochschule Biberach 2005
- [4] Hermann, M.: Elektrische Maschinen und Antriebe, Grundlagen und Berechnungsbeispiele für Einsteiger, Offenbach, VDE Verlag, 2001, ISBN 3-8007-2372-7
- [5] Moeller, Frohne, Löcherer, Müller: Grundlagen der Elektrotechnik Teubner Verlag Stuttgart, 19. Auflage, ISBN: 3-519-56400-9
- [6] Hagmann, G.: Grundlagen der Elektrotechnik, AULA Verlag, 15. Auflage, 2011, ISBN 978-3-89104-598-5
- [7] Hagmann, G.: Aufgabensammlung zu den Grundlagen der Elektrotechnik, AULA Verlag, 15. Auflage, 2011, ISBN 978-3-89104-598-5
- [8] Marinescu, M., Winter, J.: Basiswissen Gleich- und Wechselstromtechnik. 2. Auflage, Wiesbaden: Vieweg 2007
- [9] Marinescu, M., Winter, J.: Elektrische Maschinen und Antriebe, Grundlagen und Berechnungsbeispiele für Einsteiger, VDE Verlag, 2001, ISBN 3-8007-2372-7
- [10] DIN VDE 0100 Bestimmungen für das Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V., VDE-Verlag, Berlin, Offenbach

- [11] Kasikci, I.: Projektierungshilfe elektrischer Anlagen in Gebäuden, 8. Auflage, Schriftenreihe 148, VDE-Verlag 2018
- [12] Autoren des Tabellenbuches ET: Tabellenbuch Elektrotechnik. Verlag Europa-Lehrmittel. 23. Auflage, 2009
- [13] Fa. Bender: Dipl.-Ing.W.Bender GmbH, Londorfer Str. 65, 35305 Grünberg
- [14] Autoren der Fachkunde ET: Fachkunde Elektrotechnik. 28. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel, 2012
- [15] Autoren des Tabellenbuches ET: Tabellenbuch Elektrotechnik. Verlag Europa-Lehrmittel. 23. Auflage, 2009
- [16] Busch, R.: Elektrotechnik und Elektronik. 2. Auflage, Wiesbaden: B.G. Teubner 1996
- [17] Linse, H., Fischer, R.: Elektrotechnik für Maschinenbauer. 12. Auflage, Wiesbaden: B.G. Teubner 2005
- [18] Linse, H., Fischer, R.: Elektrotechnik für Maschinenbauer - Grundlagen und Anwendungen, 11. Auflage, Wiesbaden: B.G. Teubner 2002 ISBN: 3-519-36325-9
- [19] Albach, M.: Grundlagen der Elektrotechnik 1 - Erfahrungssätze, Bauelemente, Gleichstromschaltungen. Pearson Studium, 2011, ISBN: 3-8273-7106-6
- [20] Flegel, Birnstiel, Nerreter: Elektrotechnik für Maschinenbauer. München Wien: Carl Hanser Verlag ISBN: 3-446-15622-4
- [21] Seidel, W.: Allgemeine Elektrotechnik - Gleichstrom - Felder - Wechselstrom München Wien: Carl Hanser Verlag, ISBN: 3-446-22090-9
- [22] Lindner, H.: Elektroaufgaben, Band I: Gleichstrom. 29. Auflage, Fachbuchverlag Hanser, 2009
- [23] Lindner, H.: Elektroaufgaben, Band II: Wechselstrom. 24. Auflage, Fachbuchverlag Hanser 2010
- [24] DIN 18015-1: 2013 Elektrische Anlagen in Wohngebäuden, Planungsgrundlagen
- [25] DIN 18015-3: 2016 Elektrische Anlagen in Wohngebäuden, Leitungsführung und Anordnung der Betriebsmittel
- [26] DIN 18014: 2014 Fundamentender, Allgemeine Planungsgrundlagen

- [27] Schultke, H.: ABC der Elektroinstallation. 13. Auflage, VDEW, ISBN 3-8022-0774-2, 2004
- [28] Schmolke, H.: Brandschutz in elektrischen Anlagen. Praxishandbuch für Planung, Errichtung Prüfung und Betrieb, 2012
- [29] Schmolke, H.: Elektro-Installation in Wohngebäuden. Handbuch für die Installationspraxis: 2010
- [30] Schmolke, H.: Potentialausgleich, Fundamenterder, Korrosionsgefährdung. DIN VDE 0100, DIN 18014 u.a. 18. Mai 2009
- [31] G, Kiefer, H. Schmolke, H.: VDE 0100 und die Praxis, Wegweiser für Anfänger und Profis 14. Aufl., ISBN 978-3-800-73284-5, VDE-Verlag 2011
- [32] DIN IEC 60479-1: 2007-05 Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere Teil 1: Allgemeine Aspekte
- [33] ABB: Hauptkatalog 2011-2012, Teil 2 (Installationsgeräte), ABB STOTZ-KONTAKT GmbH, Postfach 101680, 69006 Heidelberg
- [34] ABB STOTZ: Hauptsicherungsautomaten, Postfach 10 16 80, 69006 Heidelberg Eppelheimer Straße 82, 69123 Heidelberg
- [35] Bender: Elektrische Sicherheit für die Elektromobilität, 2164 de - 10.2015 - pdf - Bender GmbH und Co. KG, Germany
- [36] DKE: Der Technische Leitfaden Ladeinfrastruktur Elektromobilität, Version 2, 2016
- [37] Kasikci, I., Pantenburg, N.: VDE-Lehrgang, Projektierung von Niederspannungsanlagen, Offenbach: 2018
- [38] Kasikci, I.: Lehrgang: Berechnung von Elektroanlagen Technische Akademie Esslingen: 2012
- [39] Kasikci, I., Pantenburg, N.: Projektierung von Niederspannungsanlagen, VDE-Seminar, Offenbach: 2018
- [40] ABB STOTZ: Verlegearten, Strombelastbarkeit von Leitungen und Kabeln nach DIN VDE 0298-4/August 2003
- [41] Schmolke, H.: Brandschutz in elektrischen Anlagen. Praxisbuch für Planung, Errichtung und Betrieb, Heidelberg, München, Hüthig und Pflaum, 2001
- [42] Fröse, H.-D: Brandschutz für Kabel und Leitungen. München, Pflaum-Verlag, 1998

- [43] Siemens: Brandschutzschalter, erweiterter Brandschutz Modernste Technologie für umfassenden Schutz vor elektrisch verursachten Bränden, Bestell-Nr. E10003-E38-2B-G0012
- [44] Schmidt, F.: Brandschutz in der Elektroinstallation. 3. Auflage, Verlag Technik, Berlin: 2000
- [45] FLAMRO: Brandschutz-Systeme GmbH Am Sportplatz 2, 56291 Leiningen, Tel. +49 (0) 6746 9410-0, Fax +49 (0) 6746 9410-10, www.flamro.de, info@flamro.de
- [46] Hager: Technisches Handbuch
- [47] Elektrotechniker-Handwerk - DIN-Normen und technische Regeln für die Elektroinstallation. 3. Auflage, ISBN: 3-410-17745-0 / 978-3-410-17745-6, 2009-10
- [48] Schauer, K.: Planungshilfen für die Elektroinstallation. Berechnungen, Formeln, Tabellen für den Fachplaner. Heidelberg: Hüthig, 1997
- [49] DIN 276-1: Kosten im Bauwesen - Teil 1, Hochbau, Beuth-Verlag 2008-12
- [50] Seip, G.G.: Elektrische Installationstechnik. 4. Aufl. Berlin, München: Wiley-VCH Verlag 2000
- [51] VWEW: Praxis des Netzbetriebes, Planung und Bau von Niederspannungsanlagen, Mai 1991, Heft 1 VWEW
- [52] Giersch, H-U.; Harthus, H.; Vogelsang, N.: Elektrotechnik für Fachschulen, Elektrische Maschinen. 3. Aufl. Stuttgart: B.G. Teubner, 1991
- [53] DIN EN 61439-1: 2012-02 Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen, Teil 1: Allgemeine Festlegungen
- [54] DIN EN 61439-2: 2012-06 Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen, Teil 2: Energie-Schaltgerätekombinationen
- [55] DIN VDE 0100-100 (VDE 0100-100): Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 1: Allgemeine Grundsätze, Bestimmungen allgemeiner Merkmale, Begriffe, Berlin
- [56] DIN VDE 0100-200 (VDE 0100-200): Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 200: Begriffe
- [57] DIN VDE 0100-410 (VDE 0100-410): Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 4-41: Schutzmaßnahmen - Schutz gegen elektrischen Schlag, Berlin

- [58] DIN IEC 60364-4-43 (VDE 0100-430): Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 4-43: Schutzmaßnahmen - Schutz bei Überstrom, Berlin
- [59] DIN VDE 0100-520 (VDE 0100-520): Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 5-52: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmitteln, Berlin
- [60] DIN VDE 0100-520: Beiblatt 2 zu DIN VDE 0100-520, zulässige Strombelastbarkeit, Schutz bei Überlast, maximal zulässige Kabel- und Leitungslängen zur Einhaltung des zulässigen Spannungsfalls und der Abschaltbedingungen, Berlin: 2010-10
- [61] DIN VDE 0100: Beiblatt 5, zulässige Längen von Kabeln und Leitungen unter Berücksichtigung des Schutzes bei indirektem Berühren, des Schutzes bei Kurzschluss und des Spannungsfalls, Berlin: 2013
- [62] DIN VDE 0100-540 (VDE 0100-540): Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 5-54: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel - Erdungsanlagen, Schutzleiter und Schutzpotentialausgleichsleiter, Berlin
- [63] DIN VDE 0100-600 (VDE 0100-600): Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 6: Prüfungen, Berlin
- [64] DIN EN 50522 (VDE 50522): Starstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV, Berlin
- [65] DIN VDE 0276 Teil 1000 (VDE 1995-06): Strombelastbarkeit; Allgemeines; Umrechnungsfaktoren
- [66] DIN VDE 0100-710 (VDE 0100-710-2002-11): Errichten von Niederspannungsanlagen - Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art - Teil 710: Medizinisch genutzte Bereiche
- [67] DIN VDE 0100-718 (VDE 0100-718:2005-10): Errichten von Niederspannungsanlagen - Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art - Teil 718: Bauliche Anlagen für Menschenansammlungen
- [68] TAB: 2007 Technische Anschlussbedingungen, Ausgabe: Juli 2017
- [69] TAB: Ergänzung zur TAB 2007 Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an das Niederspannungsnetz (TAB 2007), Ausgabe: Juli 2017
- [70] ABB: Haupt-Sicherungsautomaten, Baureihe S 750, Technische Daten
- [71] VOB: 1999 Verdingungsordnung für Bauleistungen
- [72] EnWG: Energiewirtschaftsgesetz §16- Teil 6 - Sicherheit und Zuverlässigkeit der Energieversorgung (49 – 53a)§49 Anforderungen an Energieanlagen

- [73] Bauordnungen (BO): Bauordnungen (BO)
- [74] BGV A3: Unfallverhütungsvorschrift elektrischer Anlagen und Betriebsmittel (früher BGV A2 und VBG 4)
- [75] MLAR: Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Leitungsanlagen 1 (Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie MLAR, Stand: 17.11.2005)
- [76] Kasikci, I.: Kurzschlussstromberechnung in elektrischen Anlagen nach DIN EN 60909 (VDE 0102), 5. Auflage, Stuttgart: Expert-Verlag 2016
- [77] DIN EN 60909-0 (VDE 0102:2002-07): Berechnung von Kurzschlussströmen in DS-Netzen
- [78] ABB: ABB Schaltanlagen Handbuch, 11. Auflage, Cornelsen, ISBN 10 3-589-24112-8
- [79] Beiblatt 1 zu DIN VDE 0102: Berechnung von Kurzschlussströmen in DS-Netzen; Beispiele
- [80] Beiblatt 2 zu DIN VDE 0102: Anwendungsleitfaden für die Berechnung von Kurzschlussströmen in DS-Netzen
- [81] Beiblatt 3 zu DIN VDE 0102: Berechnung von Kurzschlussströmen in DS-Netzen; Faktoren
- [82] Beiblatt 4 zu DIN EN 60909-0 (VDE 0102:2009-08): Kurzschlussströme in Drehstromnetzen, Daten elektrischer Betriebsmittel für die Berechnung von Kurzschlussströmen
- [83] Klaus Faber AG: Faber Kabel, Lebacher Straße 152 - 156, 66113 Saarbrücken
- [84] Siemens Aktiengesellschaft (Hrsg.): Schalten, Schützen, Verteilen in Niederspannungsnetzen. 4. Aufl. Wiley-VCH Verlag, 1997
- [85] DIN VDE 0103: 1988-04 Bemessung von Starkstromanlagen auf mech. und therm. Kurzschlussfestigkeit
- [86] Knies. W., Schierack. K.: Elektrische Anlagentechnik, Kraftwerke, Netze, Schaltanlagen, Schutzeinrichtungen, 5. Auflage, Hanser, ISBN:3-446-40574-7
- [87] Fa. Kabelrheydt: Starkstromkabel 1-30 kV. Mönchengladbach 1996
- [88] DIN 5035: 1990-06 Beleuchtung mit künstlichem Licht

- [89] Baer: Grundlagen, Beleuchtungstechnik. 3. Auflage, Huss-Verlag, Berlin: 2006, ISBN-10:3-341-01497-7
- [90] Risikoorientierter Blitz- und Überspannungsschutz, Richtlinien zur Schadenverhütung, VdS 2010:2002-07
- [91] Oliver B.: Architekten-Vortrag 2008, Blitzschutznorm
- [92] DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3): 2007-02 Blitzschutz Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen
- [93] Trommer, W., Hampe, A.E.: Blitzschutzanlagen. Planen, Bauen, Prüfen. 2. Aufl. Heidelberg: Hüthig, 1997
- [94] Dehn+Söhne: Blitzplaner, 2. aktualisierte Auflage, 2007, ISBN 978-3-00-021115-7
- [95] Dehn+Söhne: Seminarunterlagen, Blitzschutz, Erdung, Überspannungsschutz, 2010
- [96] Dehn+Söhne: Muster-Leistungsverzeichnis, Blitzschutz, Erdung, Überspannungsschutz, 1996
- [97] DEHNsupport Toolbox: Planungssoftware für Blitzschutzsysteme
- [98] Dehn+Söhne: Fundamenterder. DS162/1011, Neumarkt: 2011
- [99] LION: OTAG Vertriebs GmbH + Co. KG, Zur Hammerbrücke 9, 59939 Olsberg
- [100] Trafo-Union: Öl-Verteilungstransformatoren, TV2-1996
- [101] Albert, F.: Verteilungstransformatoren und EMV, Sonderdruck aus etz Bd. 1155 (1994), Heft 20
- [102] Trafo-Union: GEAFOL-Gießharztransformatoren, TV1-1995
- [103] Trafo-Union: GEAFOL-Planungshinweise
- [104] Kasikci, I.: Seminar-Transformatoren, TAE, Ostfildern-Nellingen 2002, GEAFOL-Planungshinweise
- [105] ABB STOTZ: Auslöse-Charakteristiken für Sicherungsautomaten im Vergleich
- [106] VDEW: Technische Anschlussbedingungen, TAB 2007, VDEW, VVEW-Verlag, Frankfurt am Main

- [107] Promat: Promat-Elektrohandbuch, Bautechnischer Brandschutz
- [108] Fabry, H-T.: Brandschutz-Fibel, Funktionserhalt von elektrischen Kabelanlagen im Brandfall gemäß DIN 4102 Teil 12, 2001
- [109] de: Der Elektro- und Gebäudetechniker. Organ des ZVEH, Hefte 23,24/2001, 3/2002
- [110] Trilux: Beleuchtungspraxis, Innenbeleuchtung
- [111] Nexans: Starkstromkabel, 1 kV bis 30 kV
- [112] DIN EN 12464-1: Beleuchtung von Arbeitsstätten-Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen
- [113] LTG: Fördergemeinschaft Gutes Licht, Lyoner Straße 9, 60528 Frankfurt am Main, licht.wissen-05 Industrie und Handwerk, ISBN-Nr. Druckausgabe 978-3-926193-46-9
- [114] Robert, S.: Handbuch für Beleuchtung, 4., völlig neu bearbeitete Auflage, Verlag W.Girardet, Essen, ISBN 3-7736-0715-6
- [115] Trilux: Beleuchtungsplanung, Programm-TXI-WIN
- [116] FGL: Fördergemeinschaft Gutes Licht, Band 1: Beleuchtung mit künstlichem Licht, 4/93
- [117] VdS: Störungsarme Elektroinstallation, Richtlinien zur Schadenverhütung, VdS 2349:2000-02
- [118] DKE: Die deutsche Normungsroadmap, E-Energy/Smart Grid
- [119] Hager: Intelligente Messsysteme für Smart Metering und Smart Grid, Die VDE-AR-N 4101:2011-9, Stand: 12/2011, 12DE0075

Stichwortverzeichnis

- Ableiter, 302, 319
- Abschaltbedingung -TN-System, 223
- Abschaltbedingung -TT-System, 223
- Abschaltstrom, 217
- Admittanz, 129
- AFDD, 240
- Akustik, 282
- Allgemeinbeleuchtung, 337
- Ampere, 14
- Arbeit, 35
- Atome, 17

- Basisschutz, 218
- Bauordnungen, 188
- Bedarfsfaktor, 163
- Befestigungssysteme, 277
- Beiblatt 2, 272
- Belüftung, 355
- Beleuchtung, 191
- Beleuchtungskonzepte, 332
- Beleuchtungsniveau, 337
- Beleuchtungsstärke, 331
- Beleuchtungswirkungsgrad, 331
- Bemessungsregeln, 262
- Berührungsspannung, 218
- Berührungsspannung, 302
- Betriebserdung, 289
- Bezugserde, 301
- BGB, 154
- BGV A2, 154
- BGV A3, 189

- Blendungsbegrenzung, 338
- Blindleistung, 131
- Blindstromkompensation, 132
- Blitzschutz, 371
- Blitzschutz-Äußerer, 304
- Blitzschutz-Dokumentation, 326
- Blitzschutz-Innerer, 305
- Blitzschutz-Messen, 324
- Blitzschutz-Prüfen, 323
- Blitzschutzanlagen, 301
- Blitzschutzerdung, 302
- Blitzschutzklasse, 307
- Blitzstrom-Ableiter, 321
- Blitzstromableiter, 302
- Brandschutz, 280

- Candela, 14
- Checkliste-MS-Anlagen, 359
- Checkliste-NS-Anlagen, 363

- Definitionsgleichungen, 12
- Diamagnetismus, 98
- DIN 18012, 204
- Drehstromnetz, 287
- Drehstromtechnik, 137
- Druckentwicklung, 356
- Durchflutungsgesetz, 94

- Einwirkungen-Physikalische, 218
- Einwirkungen-Physiologische, 219
- Einzelplatzbeleuchtung, 337
- elektrische Anlage, 152

- elektrische Betriebsmittel, 152
elektrische Betriebsräume, 152
Elektrische Felder, 73
elektrischer Leitwert, 33
Elektrofachkraft, 153
Elektromagnetische Felder, 87
Elektromobilität, 168
Elektron, 17
elektrostatisches Feld, 76
elektrotechnische Regeln, 153
elektrotechnischer Laie, 153
EMV-Blitzschutzzone, 318
Energie, 35
Energiewirtschaftsgesetz, 188
Energiewirtschaftsgesetz, 154
Entladung einer Induktivität, 112
Entladung eines Kondensators, 84
Erder, 211, 290
Erder-Fundamenterder, 311
Erder-Oberflächenerder, 310
Erder-Ringerder, 311
Erder-Tiefenerder, 310
Erdungsanlage, 309
Erdungsanlagen, 210, 289
Erdungsleiter, 210
Erdungsspannung, 302

Farbwiedergabe, 338
Fehlerlichtbogenschalter, 239
Fehlerschutz, 218
Fehlerstromschutzschalter, 236
Feldmodell, 74
Freileitungen, 245
Fundamenterder, 211, 294
Funktionserhalt, 275

Gütemerkmale, 334
Gegeninduktion, 101, 103
Gleichstromnetz, 284
Gleichzeitigkeit, 174
Gleichzeitigkeitsfaktor, 163
Halbleiter, 21, 22

Haupterdungsschiene, 291, 371
Hausanschluss, 366
Haustechnikraum, 371

Ideale Spannungsquelle, 64
Ideale Stromquellen, 66
Induktionsgesetz, 99
Induktivität, 103, 254
Innenbeleuchtung, 329
Installation von-Empfangsanlagen, 197
Installation von-Installationsbus, 198
Installation von-Kommunikationsanlagen,
198
Installation von-Telefonanlagen, 197
Installationstechnik, 187
Instandhaltung, 152

Kabel, 246
Kabeldimensionierung, 273
Kabelrinnensysteme, 278
Kabeltragsysteme, 277
Kabeltrasse, 279
Kabeltypen, 246
Kapazität, 255
Kelvin, 14
Kilogramm, 14
Kirchhoffsche Gesetze, 42
Knotenpunkt, 43
Kommunikationstechnik, 370
Komplexe Größen, 10
Komplexen Größen, 119
Kondensator, 80
Kundenanlage, 171
Kunstlicht, 329
Kurzschlusschutz, 242
Kurzschlussspannung, 65

Ladung, 170
Ladung einer Induktivität, 112
Ladung eines Kondensators, 84
Ladungsträger, 22
Lampen, 331
LED, 331, 351

- Leerlaufspannung, 65
Leistung, 35, 162
Leistungsbedarf, 163, 172
Leistungsbilanz, 68
Leistungsfaktor, 133
Leistungsschalter, 241
Leiter, 21, 22
Leitungen, 253
Leitungsarten, 246
Leitungsführung, 182
Leitungsschutzschalter, 232
Leuchtdichte, 330
Leuchten, 331, 343
Leuchtenauswahl, 339
Leuchtenwirkungsgrad , 331
Lichtausbeute, 331
Lichtstärke, 330
Lichtstärkemethode, 340
Lichtstrom, 329
Lichtstrommethode, 341
Lichttechnik, 329
Lineare Zweipole, 63
- Magnetische Feldstärke, 92
Magnetische Energie, 113
Magnetische Flussdichte, 92
Magnetischer Fluss, 93
Magnetischer Kreis, 95
Maschenumlauf, 45
Maxwellsche Gleichung, 6
Meter, 14
Mindestausstattung, 177
Mol, 14
Moleküle, 18
Montagesysteme, 278
- Näherung, 317
Nennbeleuchtungsstärke, 337
Netzbelastung, 161
Netzbetreiber, 171
Neutron, 17
Nichtleiter, 21, 22
- Niederspannungsanlagen, 360
Nischen, 368
Normen, 188
Norton Theorem, 59
Nullphasenwinkel, 117
- Ohmsches Gesetz, 41
- Paramagnetismus, 98
PEN-Leiter, 291
Permeabilitätszahl, 97
Phasenwinkel, 125
Physikalische Gleichungen, 11
Physikalische Größen, 9
Pläne-Blitzschutz, 216
Pläne-Brandmeldung, 216
Pläne-EDV, 215
Pläne-Leitungen, 215
Pläne-RWA, 216
Pläne-Verteiler, 215
Planungswerte von Netzen, 172
Prüfstrom, 260
Proton, 17
- Raumindex, 341
Raumschirmung, 319
Raumwirkungsgrad , 331
RCD, 237
Reale Stromquellen, 67
Ringerder, 292
- Schale, 18
Schaltfelder, 357
Schattigkeit, 338
Scheinleistung, 130
Scheinwiderstand, 125
Schirmung-Gebäudeschirmung, 319
Schirmung-Geräteschirmung, 319
Schirmung-Raumschirmung, 319
Schleifenimpedanz, 217
Schmelzsicherungen, 235
Schrittspannung, 302
Schutzart, 226

- Schutzerdung, 289
Schutzklasse, 225
Schutzkonzepte, 217
Schutzleiter, 210
Schutzwinkel, 307
Sekunde, 14
Selbstinduktion, 100
Selektivität, 381
SH-Schalter, 239
SI-Basiseinheiten, 13
Skalare Feldgröße, 73
Skineffekt, 111
Sonnenlicht, 332
Spannung, 29
Spannungsfall, 283, 378
Spannungsfall-Drehstrom, 287
Spannungsfall-Gleichstrom, 284
Spannungsfall-Wechselstrom, 285
Spannungsteiler, 46
Spezifischer Widerstand, 33
Stern-Dreieck-Umwandlung, 56
Steuererder, 302
StGB, 154
Strömungsfeld, 74
Strahlenerder, 293
Strom, 23
Strombelastbarkeit, 264
Stromdichte, 27
Stromflussrichtung, 32
Stromkreis, 49
Stromteilerregel, 44

TAB, 261
Tageslicht, 332
Tageslichtplanung, 344
Tageslichtquotient, 332
Thevenen-Theorem, 58
Tiefenerder, 293
TN-System, 222
Transformatoren, 353
Trennungsabstand, 316
TT-System, 223

Überlastschutz, 242
Überspannungsableiter, 302
UGR-Methode, 336
Umrechnungsfaktoren-Häufung, 264
Umrechnungsfaktoren-Temperaturen, 269
unterwiesene Person, 153

Vektoren, 10
Vektorielle Feldgröße, 73
Verlustwärme, 356
Verschiebungsdichte, 79
Verschiebungsstrom, 80
Verteilungsnetz, 171
Vorschaltgerät, 332

Warmwasserbereitung, 164
Wartungswert, 334
Wechselstrom, 115
Wechselstromnetz, 285
Widerstände-Parallelschaltung, 54
Widerstände-Reihenschaltung, 51
Widerstand, 31, 33
Widerstand-Ausbreitungswiderstand, 301
Widerstand-spezifischer Erdwiderstand, 302
Wirbelstrom, 111
Wirkleistung, 131
Wirkungsgrad, 36, 343
Wirkwiderstand, 253

Zählerplätze, 366
Zählsystem, 35
Zusatzschutz, 220
Zweipoltheorie, 67