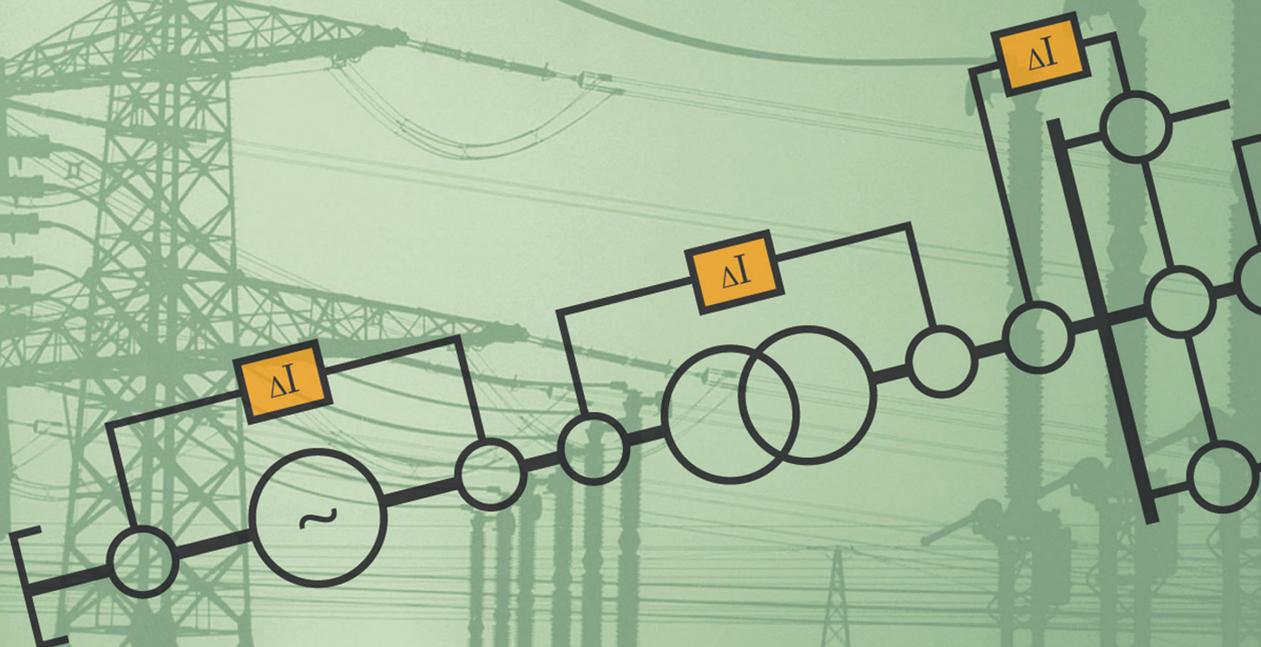


Gerhard Ziegler

# Digitaler Differentialschutz

Grundlagen und Anwendung

**SIEMENS**



2. Auflage

Ziegler Digitaler Differentialschutz



# Digitaler Differentialschutz

Grundlagen und Anwendung

von Gerhard Ziegler

2., überarbeitete und erweiterte Auflage, 2013

Publicis Publishing

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

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

[www.publicis-books.de](http://www.publicis-books.de)

**Print ISBN: 978-3-89578-416-3**

**ePDF ISBN: 978-3-89578-900-7**

2. Auflage, 2013

Herausgeber Siemens Aktiengesellschaft, Berlin und München

Verlag: Publicis Publishing, Erlangen

© 2013 by Publicis Erlangen, Zweigniederlassung der PWW GmbH

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

Printed in Germany

---

# Vorwort

## zur ersten Auflage

Der Differentialschutz ist ein schneller, absolut selektiver Schutz und wird in vielen Varianten bei elektrischen Maschinen, Transformatoren, Sammelschienen und Leitungen in allen Spannungsebenen eingesetzt.

In digitaler Technik wurden erhebliche Fortschritte erzielt, die dieses Messprinzip noch attraktiver für den Anwender machen. Dazu gehören vor allem die integrierte Wandleranpassung und die hohe Toleranz gegen Wandlersättigung. Die Nutzung der digitalen Datenübertragung über beeinflussungsfreie Lichtwellenleiter macht den Schutz von Kabeln und Leitungen in Stadt- und Industrienetzen erheblich einfacher und sicherer. In den Freileitungsnetzen der Elektrizitätsversorgung werden im zunehmenden Maße digitale Kommunikationsnetze für die Schutzdatenübertragung genutzt. Damit kann der Differentialschutz nun auch für längere Leitungen bis weit über 100 km und komplexe Netzanordnungen mit mehreren Leitungsenden eingesetzt werden.

Das vorliegende Buch vermittelt zunächst die allgemeinen Grundlagen des Differentialschutzes in analoger und digitaler Technik. Dabei werden die Themen Stromwandler, Signalübertragung und digitale Kommunikation ausführlich berücksichtigt. Darauf aufbauend werden dann die verschiedenen Arten des Differentialschutzes und die Anwendung in der Praxis behandelt. Dies geschieht anhand der Gerätereihe SIPROTEC der Firma Siemens. Im Grundsatz gelten die Ausführungen jedoch auch für die Geräte anderer Hersteller. Zum besseren Verständnis werden zu jedem Thema praktische Beispiele gerechnet.

Das Buch wendet sich an Studenten und Jungingenieure, die sich in das Thema Differentialschutz einarbeiten wollen, aber auch an praxiserfahrene Anwender, die den Einstieg in die digitale Technik des Differentialschutzes suchen. Es kann auch als Nachschlagewerk für spezielle Anwendungsfragen benutzt werden.

Nürnberg, April 2004

Gerhard Ziegler

---

# Vorwort

## zur zweiten Auflage

Die positive Resonanz auf die erste Auflage des Fachbuchs hat Autor und Verlag bewogen, diese aktualisierte Auflage zu publizieren.

Die Kapitel über Wirkungsweise und Anwendung des Differentialschutzes sind nahezu unverändert, da die digitale Schutztechnik bereits beim Erscheinen der ersten Auflage (2005) einen weitgehend ausgereiften Stand erreicht hatte und mehr als zehn Jahre Betriebserfahrung vorlagen. Die Hersteller konzentrierten die Weiterentwicklung in den letzten Jahren auf die Steigerung der Performance von Hard- und Software und die Nutzung der modernen Kommunikationstechniken. Die Schutzrelais sind inzwischen intelligente, multifunktionale Geräte (IEDs) mit einer Reihe von seriellen Schnittstellen für die lokale und ferne Kommunikation. Mit den integrierten Mess- und Steuerfunktionen werden sie als Abzweigeräte für Stationsleitsysteme eingesetzt.

In dieser 2. Auflage des Buchs wird der derzeitige Stand der Geräte- und Systemtechnik am Beispiel der neuen Siemens Gerätereihe SIPROTEC 5 beschrieben. Ebenfalls wurden alle technischen Daten, Kennlinien und Abbildungen aktualisiert. Die digitale Kommunikation wird ausführlich behandelt, insbesondere die Nutzung moderner Datenübertragungsnetze für den Leitungsdifferentialschutz.

Die Neuauflage bot auch Gelegenheit, kleinere Korrekturen vorzunehmen und die umfangreichen Referenzen zu aktualisieren. Für die dazu eingegangenen Hinweise und Anregungen der Leser bedanken wir uns herzlich.

Autor und Herausgeber hoffen, dass dieses Arbeitsbuch und Nachschlagewerk auch weiterhin mit Interesse aufgenommen und genutzt wird.

Nürnberg, November 2012

Gerhard Ziegler

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	10
1.1 Schutzprinzip .....	10
1.2 Digitaler Differentialschutz .....	11
<b>2 Definitionen</b> .....	12
<b>3 Wirkungsweise</b> .....	16
3.1 Einführung .....	16
3.2 Grundprinzipien .....	18
3.2.1 Strom-Differentialschutz .....	18
3.2.2 Stabilisierter Differentialschutz .....	21
3.2.3 Differentialschutz mit zwei Hilfsadern .....	25
3.2.4 Ansprechennlinien .....	28
3.3 Messschaltungen für Drehstromsysteme .....	33
3.3.1 Messung pro Phase .....	34
3.3.2 Mischstrom-Ausführung .....	35
3.4 Hochimpedanzdifferentialschutz .....	41
3.5 Partieller Differentialschutz .....	48
<b>4 Messtechnik</b> .....	50
4.1 Klassische (analoge) Verfahren .....	50
4.2 Digitale Messverfahren .....	53
4.2.1 Messwerterfassung .....	53
4.2.2 Differentialschutz mit Momentanwertvergleich .....	55
4.2.3 Differentialschutz mit Zeigergrößen .....	58
4.2.4 Zusatzstabilisierung bei Wandlersättigung .....	65
<b>5 Stromwandler</b> .....	68
5.1 Ersatzschaltung des Stromwandlers .....	68
5.2 Normen für stationäres Verhalten der Stromwandler .....	71
5.3 Transientes Verhalten der Stromwandler .....	76
5.4 TP Stromwandlerklassen .....	80
5.5 Polarität der Stromwandler .....	83
5.6 Fehler der Stromwandler .....	84
5.7 Auslegung der Stromwandler .....	87
5.8 Stromzwischenwandler .....	98

<b>6 Signalübertragung</b>	117
6.1 Übertragungskanäle	117
6.1.1 Hilfsadern	117
6.1.2 Lichtwellenleiter	127
6.1.3 Richtfunk	133
6.2 Digitale Schutzkommunikation	134
6.3 Digitale Kommunikationsnetze	143
<b>7 Maschinen-Differentialschutz</b>	151
7.1 Generator-Differentialschutz	152
7.2 Motor-Differentialschutz	168
<b>8 Transformator-Differentialschutz</b>	170
8.1 Physikalische Grundlagen	170
8.2 Digitale Messwertverarbeitung	177
8.3 Hoch-Impedanz-Differentialschutz	189
8.4 Geräte für Transformator-Differentialschutz	192
8.5 Anwendungsbeispiele für der Transformatorschutz	193
<b>9 Leitungsdifferentialschutz</b>	205
9.1 Dreiadern-Differentialschutz	205
9.2 Zweiadern-Differentialschutz	207
9.3 Leitungs-Differentialschutz mit digitaler Kommunikation	217
9.3.1 Geräte und Systemkonfiguration	218
9.3.2 Messtechnik	219
9.3.3 Signalkonverter für die Kommunikation	224
9.3.4 Zusatzfunktionen und Anwendungshinweise	226
9.4 Phasenvergleichschutz mit digitaler Kommunikation	229
9.5 Differentialschutz von Leitungen mit Transformatoren	234
9.5.1 Schutz von Transformatorleitungen	234
9.5.2 Differentialschutz für angezapfte Leitungen	235
<b>10 Sammelschienen-Differentialschutz</b>	239
10.1 Sammelschienen-Differentialschutz mit niederohmigem Messsystem	241
10.1.1 Teil-digitaler Sammelschienen-differentialschutz 7SS600	243
10.1.2 Voll-digitaler Sammelschienen-schutz 7SS52	247
10.2 Verhalten des digitalen Sammelschienen-schutzes bei Wandlersättigung und Anforderungen an die Stromwandler	255
10.3 Hochimpedanz-Sammelschienen-schutz	263

---

<b>11 Geräteausführung</b> .....	266
<b>12 Inbetriebsetzung und Wartung</b> .....	273
12.1 Inbetriebsetzung .....	273
12.2 Wartung .....	275
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	276
<b>Anhang</b> .....	284
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	285

---

# 1 Einleitung

Der Differentialschutz wurde bereits Ende des 19. Jahrhunderts angewendet, als eine der ersten Schutzeinrichtungen überhaupt.

Die Fehlererkennung erfolgt durch Vergleich der Ströme, die in das Schutzobjekt hinein- und herausfließen. Auf Grund der kurzen Auslösezeit bei absoluter Selektivität eignet er sich als Hauptschutz für alle wichtigen elektrischen Betriebsmitteln, das heißt Generatoren, Transformatoren, Sammelschienen sowie Kabel und Leitungen.

Der Schutzbereich ist durch die Einbauorte der Stromwandler eindeutig begrenzt.

Als Reserveschutz für externe Fehler muss deshalb immer ein zusätzlicher Zeitstaffelschutz (Überstromzeitschutz oder Distanzschutz) vorgesehen werden.<sup>1</sup>

## 1.1 Schutzprinzip

Der Differentialschutz bildet die Summe aller zu- und abfließenden Ströme eines Schutzbereiches. Abgesehen von Magnetisierungsströmen oder kapazitiven Ladeströmen muss diese Stromsumme im fehlerfreien Zustand des Schutzobjekts Null sein (Kirchhoff'sches Gesetz). Ein innerer Fehler kann damit durch Auftreten eines Differenzstromes erkannt werden. Zur Sicherheit gegen Fehlansprechen bei Wandlerfehlern wird der Ansprechwert des Schutzes mit zunehmendem Gesamtstrom proportional angehoben (Stabilisierter Differentialschutz). Damit passt sich die Fehlerempfindlichkeit des Schutzes automatisch an die gegebenen Kurzschlussverhältnisse an.

Der Differentialschutz lässt sich besonders einfach realisieren bei räumlich begrenzten Schutzobjekten (Generatoren, Transformatoren, Sammelschienen), wo die Wandler für die Stromerfassung nahe beieinander liegen. Das Schutzgerät kann in diesem Fall direkt über Steuerkabel an die Wandler angeschlossen werden.

Bei Kabeln und Freileitungen müssen die Strommesswerte für den Vergleich über größere Entfernungen zum jeweiligen Gegenende übertragen werden. Mit Hilfsadernverbindungen (speziellen Schutzkabeln) können dabei Entfernungen bis etwa 25 km überbrückt werden. Bei modernen Relais mit digitaler Informationsübertra-

---

<sup>1</sup> Bei digitalen Geräten ist der Reserveschutz meist in einfacher Form integriert, so dass im Verteilungsnetz auf ein getrenntes Gerät verzichtet werden kann. Ein Zweitschutz für Fehler auf der eigenen Leitung muss, aus Gründen der Hardware-Redundanz, jedoch immer in einem getrennten Gerät aufgebaut sein. Dies ist vor allem im Übertragungsnetz der Fall.

gung über Lichtwellenleiter oder Datennetze kann der Differentialschutz nun auch für lange Freileitungsstrecken über 100 km eingesetzt werden.

Eine besondere Variante des Differentialschutzes ist der *Hochimpedanz-Differentialschutz* (englisch: high impedance differential protection). Er ist an das nichtlineare Übertragungsverhalten der Stromwandler angepasst und erreicht die Stabilität gegen Wandlersättigung durch einen hohen Vorwiderstand am Differentialrelais.

Der Hochimpedanz-Differentialschutz ist im angelsächsischen Raum weit verbreitet auf Grund seines einfachen Aufbaus. Er ist geeignet zum Schutz von galvanisch durch verbundenen Einheiten, wie Sammelschienen, Generatoren, Motoren, Kompensationsspulen und Spartransformatoren, nicht jedoch für normale Volltransformatoren mit getrennten Wicklungen. Ein Nachteil ist, dass die Stromwandler alle gleich ausgeführt sein müssen.

## 1.2 Digitaler Differentialschutz

Ende der 80er Jahre wurde die digitale Technik beim Schutz eingeführt [1-1].

Sie bietet eine Reihe von allgemeinen Vorteilen:

- Die modernen Relais sind multifunktional und können damit neben den Schutzfunktionen auch andere Aufgaben übernehmen, wie Betriebsmessung und Störschreibung.
- Die integrierte Selbstüberwachung ermöglicht eine ereignisorientierte Fehlerbehebung anstelle der aufwendigen vorbeugenden Wartung.
- Die Geräte können mit dem PC über serielle Schnittstellen nah- und fernbedient werden.
- Die integrierten Messfunktionen zeigen alle wichtigen Größen an. Externe Messgeräte sind deshalb bei der Inbetriebnahme und Prüfung nur noch in Ausnahmefällen erforderlich.

Für den Differentialschutz ergeben sich noch besonderen Vorteile:

- Die digitale Messtechnik ermöglicht erheblich verbesserte Filter für die Einschalt-(Rush)-Stabilisierung und intelligente Messalgorithmen für die Zusatzstabilisierung bei Wandlersättigung.
- Zur Anpassung an unterschiedliche Wandlerübersetzungen oder die Schaltgruppen von Transformatoren waren in konventioneller Technik Stromzwischenwandler erforderlich. Bei digitalen Relais erfolgt die Anpassung intern rechnerisch.
- Die phasentrennte Messung kann mit vertretbarem Aufwand realisiert werden und ermöglicht so gleiche Ansprechempfindlichkeit bei allen Fehlerarten und Ansprechsicherheit bei Mehrfachfehlern.
- Signalverbindungen sind in die laufende Selbstüberwachung eingeschlossen.
- Beim Sammelschienenschutz konnte der Aufwand erheblich reduziert werden, durch dezentralen Aufbau, Kommunikation über LWL und PC basierte Konfiguration.

---

## 2 Definitionen

In diesem Dokument werden die nachstehenden Begriffe verwendet.

Sofern sie mit den Definitionen des Internationalen Elektrotechnischen Wörterbuchs IEC, Kapitel 448 „Energienetz - Selektivschutz“ übereinstimmen, ist jeweils die entsprechende Referenznummer angegeben:

### *Selektivschutz*

Gesamtheit der Maßnahmen zum Erfassen von Netzfehlern oder anormalen Betriebszuständen in einem Energienetz, die die Fehlerbeseitigung, die Beendigung der anormalen Zustände und die Signalisierung oder Anzeige bewirken [448-11-01].

### *Schutzrelais*

Messrelais, das entweder einzeln oder in Verbindung mit anderen Relais Bestandteil einer Schutzeinrichtung ist [448-11-02].

### *Schutzeinrichtung*

Einrichtung, die ein oder mehrere Schutzrelais sowie, sofern erforderlich, Logikbausteine enthält, um eine oder mehrere vorgegebene Schutzfunktionen zu erfüllen [448-11-03].

### *Schutzsystem*

Anordnung aus einer oder mehreren Schutzeinrichtungen sowie weiteren Geräten, die vorgesehen sind, um eine oder mehrere vorgegebene Schutzfunktionen zu erfüllen [448-11-04].

Anmerkung: Zum Schutzsystem gehören auch Messwandler, Verdrahtung, Ausschaltstromkreise, sowie, falls vorgesehen, Informationssysteme. Nicht enthalten sind Leistungsschalter.

### *Digitaler Schutz*

Schutz in Mikroprozessortechnik mit analog zu digitaler Umsetzung der Messwerte (Ströme und Spannungen) und rechnerischer (numerischer) Verarbeitung.

Teilweise ist dafür auch der Begriff „Numerischer Schutz“ in Gebrauch.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Im Englischen wurde der Begriff „numerical relay“ häufig für ein voll digitales (fully digital) Relais verwendet. Der Begriff „digital relay“ bezeichnete dann den Vorläufertyp mit analog statischer Messwertanpassung und digitaler Auswertung auf Basis von Mikroprozessoren. Inzwischen wird jedoch allgemein der Begriff digitaler Schutz („digital relay“) verwendet.

*Vergleichsschutz (Selektivschutz mit absoluter Selektivität)*

Selektivschutz, dessen Funktionsweise und Abschnittsselektivität vom Vergleich der elektrischen Größen von jedem Ende des geschützten Abschnitts abhängig ist.

Im Englischen wird dafür der Ausdruck „Unit Protection“ verwendet.

*Differentialschutz*

Vergleichsschutz, dessen Funktion auf dem Vergleich von Strömen nach Größe und Phasenlage (Momentanwerte oder Zeiger) beruht, wobei die Stromdifferenz das Ansprechkriterium darstellt.

*Längsdifferentialschutz*

Selektivschutz, dessen Funktion und Selektivität vom Vergleich des Betrages oder dem Betrag und dem Phasenwinkel der Ströme an den Enden des geschützten Abschnitts abhängig ist [448-14-16].

*Querdifferentialschutz*

Selektivschutz mit relativer Selektivität, der bei parallel geschalteten Stromkreisen angewandt wird und dessen Funktion von der unsymmetrischen Stromverteilung zwischen diesen Stromkreisen abhängig ist [448-14-17].

*Stabilisierter Differentialschutz (alt: Prozentdifferentialschutz)*

Differentialschutz, bei dem der Ansprechwert mit steigendem Durchgangsstrom (Summe der Strombeträge aller Enden des Schutzbereichs) angehoben wird.

*Hochohmiger Differentialschutz (englisch: high impedance differential protection)*

Strom-Differentialschutz, bei dem ein Differentialrelais verwendet wird, dessen Impedanz im Vergleich zur Impedanz des Sekundärstromkreises eines gesättigten Stromwandlers hoch ist [448-14-22].

*Niederohmiger Differentialschutz (allgemein als „Differentialschutz“ bezeichnet)*

Strom-Differentialschutz, bei dem ein Differentialrelais verwendet wird, dessen Impedanz niederohmig ist im Vergleich zur Impedanz des Sekundärstromkreises eines gesättigten Stromwandlers [448-14-23].

*Phasenvergleichsschutz*

Selektivschutz, dessen Funktion und Selektivität vom Vergleich der Phasenlage der Ströme von jedem Ende des geschützten Abschnitts abhängig ist [448-14-18].

*Abschnittsbezogene Zone*

Der selektive Teil eines Sammelschienenschutzes für Mehrfachsammschienen, der den Stromfluss eines einzelnen Abschnitts der Sammelschiene überwacht.

*Check-Zone*

Anlagenübergreifende, nicht abschnittsselektive Zone eines Sammelschienenschutzes, die den Stromfluss an den Außenklemmen der Schaltanlage überwacht.

### *Nullstromdifferentialschutz*

Selektivschutz, bei dem der Summenstrom eines dreiphasigen Stromwandlersatzes mit dem Summenstrom eines gleichartigen Stromwandlersatzes oder häufiger mit dem Strom eines Sternpunktstromwandlers<sup>1</sup> verglichen wird [448-14-29].

### *Partieller Differentialschutz* (englisch: partial differential protection)

Diese Schaltung wird in der angelsächsischen Schutztechnik häufig eingesetzt bei paralleler Einspeisung über eine längsgeteilte Sammelschiene mit Kuppelschalter. Dabei werden die Stromrelais in den Einspeisungen an den Differenzstrom zwischen Einspeise- und Kupplungsstrom angeschlossen. In der Staffelung der Stromrelais kann damit eine Zeitstufe eingespart werden (siehe Abschnitt 3.5).

### *Kurzschlusschleife* (Fehlerschleife)

Der vom Kurzschlussstrom von der Einspeisequelle zum Fehlerort durchflossene Hin- und Rückweg im Energienetz.

### *Kurzschlussimpedanz*

Impedanz im Kurzschluss zwischen der fehlerhaften Phase (Außenleiter) und Erde oder zwischen den fehlerbehafteten Phasen (Außenleitern)<sup>2</sup> [448-14-11].

### *Quellenimpedanz* (Vorimpedanz)

Für einen bestimmten Fehlerort ist die Vorimpedanz der Impedanzanteil der Kurzschlusschleife zwischen dem Anschlusspunkt der Spannung des Messrelais und der Quellenspannung, die den Kurzschlussstrom liefert [448-14-13].

### *Fehlerwiderstand*

Widerstand an der Fehlerstelle zwischen den Phasenleitern oder zwischen Phasenleiter und Erde.

### *Zeiger* (englisch „phasor“)

In diesem Buch wird die Zeigerdarstellung für die elektrischen Größen verwendet:

$$\underline{A} = A \cdot e^{j\varphi} = A \cdot (\cos \varphi + j \sin \varphi) = B + jC$$

$$A = \sqrt{B^2 + C^2}$$

Dabei bezeichnet  $A$  jeweils den *Effektivwert* von Strom, Spannung oder Leistung, und  $\varphi$  deren Phasenlage im Bezug auf den Zeitpunkt  $t = 0$ .

Die Darstellung wird im erweiterten Sinn auch für Impedanzen benutzt die nicht zeitabhängig sind.

---

<sup>1</sup> Es wird die in der Praxis noch übliche Bezeichnung „Sternpunkt“ verwendet. Die genormte Bezeichnung ist jetzt „Neutralpunkt“.

<sup>2</sup> Nach DIN VDE 1304 gilt als genormte Bezeichnung Außenleiter. Im Sprachgebrauch der Schutztechnik hat sich jedoch der Begriff Phase erhalten, wie er auch im Englischen üblich ist.