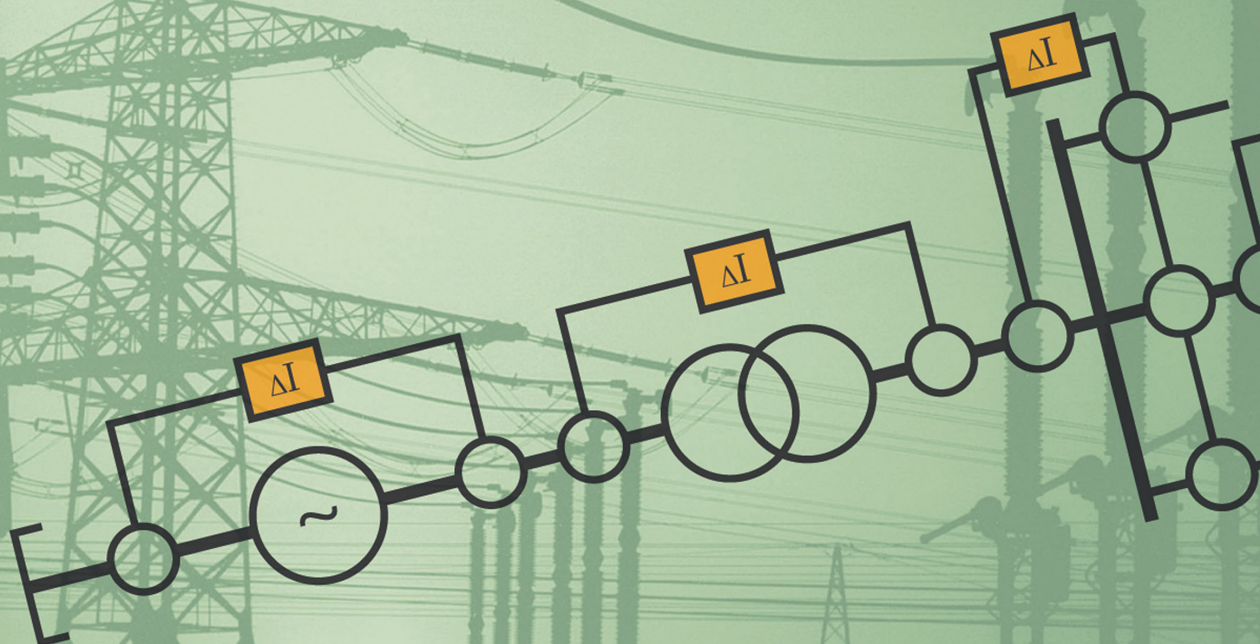


Gerhard Ziegler

# 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 Sammelschienendifferentialschutz 7SS600 .....	243
10.1.2 Voll-digitaler Sammelschienenschutz 7SS52 .....	247
10.2 Verhalten des digitalen Sammelschienenschutzes bei Wandlersättigung und Anforderungen an die Stromwandler .....	255
10.3 Hochimpedanz-Sammelschienenschutz .....	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.

### Vektor

Diese Bezeichnung wird häufig statt Zeiger benutzt. (A kann dabei auch der Maximalwert der elektrischen Wechselstromgröße sein.)

### $\alpha$ - und $\beta$ -Ebene (englisch: $\alpha$ - and $\beta$ -plane)

Die Ansprechkennlinie des Differentialschutzes kann abhängig von Stromverhältnis  $\underline{\alpha} = \underline{I}_A / \underline{I}_B$  beziehungsweise  $\underline{\beta} = \underline{I}_B / \underline{I}_A$  in der komplexen Ebene dargestellt werden (Polarcharakteristik). Dabei ist  $\underline{I}_A$  der Strom am lokalen Ende und  $\underline{I}_B$  der Strom am entfernten Ende. Die Anwendung erfolgt vorwiegend beim Leitungsdifferentialschutz.

### Polarcharakteristik

Darstellung der Ansprechcharakteristik des Differentialschutzes als Verhältnis der zu vergleichenden Ströme (siehe  $\alpha$ - und  $\beta$ -Ebene).

### Strom-Zählpfeile beim Differentialschutz

In diesem Buch werden die in den Schutzbereich hineinfließenden Ströme positiv gezählt, das heißt die vektorielle Stromsumme beim inneren Fehler ist  $\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \dots + \underline{I}_n$ .

Nach dieser Definition entspricht die Stromsumme dem Differenzstrom.

### Polarität bei Stromwandlern

Wenn nicht besonders gekennzeichnet, werden in diesem Buch bei Transformatoren und Wandlern folgende Polaritätsregeln vorausgesetzt (siehe Abschnitt 5.5, Bild 5.11).

- Primär-, Sekundärwicklung und eventuell weitere Wicklungen haben gleichen Wicklungssinn.
- Die Spannungen an den Wicklungen haben gleiche Polarität, das heißt sie liegen in Phase
- Die Ströme haben entgegengesetzte Polarität, das heißt sie durchfließen die Wicklungen in entgegengesetzter Richtung ( $i_1 \cdot w_1 + i_2 \cdot w_2 + \dots + i_n \cdot w_n = 0$ ).

### Phasen (Außenleiter)

In diesem Buch wird statt „Außenleiter“ der in der Schutztechnik (auch im Ausland) übliche Begriff „Phase“ verwendet. Das heißt, es werden zum Beispiel die Bezeichnungen Phase L1, statt Außenleiter L1, und phasenselektiv, statt leiterselektiv, benutzt.

### Leiter-/Phasenbezeichnung

In diesem Buch wird in der Regel die genormte DIN/VDE- bzw. IEC-Bezeichnung L1, L2, L3 verwendet. Bei Formeln wird, wo es die Übersichtlichkeit erfordert, auch die alte Bezeichnung R, S, T beziehungsweise r, s, t benutzt.

### Nullstrom

Gemäß der Rechnung mit symmetrischen Komponenten ist der Nullstrom ein Drittel des Erdstroms  $I_0 = 1/3 \cdot I_E$ .



---

## 3 Wirkungsweise

In diesem Abschnitt werden zunächst die Grundlagen des Differentialschutzes erläutert. In weiteren Kapiteln folgen die verschiedenen Schutzprinzipien und Messverfahren. Das Verhalten der Stromwandler und die Signalübertragung werden danach ausführlich betrachtet, da die Zuverlässigkeit des gesamten Schutzsystems davon abhängt. Darauf aufbauend werden die anlagenspezifischen Schutzeinrichtungen für Maschinen, Transformatoren, Leitungen und Sammelschienen vorgestellt, jeweils mit der Diskussion relevanten Anwendungsfragen.

### 3.1 Einführung

Der Differentialschutz ist absolut selektiv und spricht nur auf Fehler in dem eigenen Bereich an. Die Bereichsgrenzen sind dabei durch die Lage der Stromwandler eindeutig vorgegeben. Eine zeitliche Koordinierung mit anderen Schutzeinrichtungen ist deshalb nicht erforderlich und es kann immer in Schnellzeit ausgelöst werden.

Der Differentialschutz ist deshalb geeignet als schneller Hauptschutz für alle wichtigen Betriebsmittel.

Der Differentialschutz ist durch den reinen Stromvergleich einfach im Aufbau. Die Stabilität bei äußeren Fehlern erfordert jedoch eine ausreichende Dimensionierung und Abstimmung der Stromwandler. Allerdings verlangt die wirtschaftliche Auslegung der Wandler, dass der Differentialschutz eine Sättigung der Wandler im hohen Maß zulassen muss. Die Feststellung der Sättigung und eine geeignete Stabilisierung gegen die auftretenden Falschströme sind deshalb wichtige Zusatzaufgaben bei diesem Messprinzip.

Der Differentialschutz kommt in großen Stückzahlen bei Maschinen- und Transformatoren zum Einsatz, wo er durch die hohe Ansprechempfindlichkeit und die kurze Kommandozeit wesentlich zur Schadensbegrenzung beiträgt. Als Leitungsdifferentialschutz wird er hauptsächlich bei Kabelstrecken eingesetzt, insbesondere bei kurzen Entfernungen, wo die Distanzmessung problematisch ist. Bei Einsatz auf längeren Strecken bis maximal 25 km, ist allerdings die Störbeeinflussung der Hilfsadern durch Erdkurzschlussströme zu berücksichtigen und es müssen eventuell besondere Schirmungs- und Abriegelungsmaßnahmen getroffen werden. Der digitale Differentialschutz mit serieller Datenübertragung über Lichtwellenleiter ist davon unabhängig und es können Leitungen von mehr als 100 km geschützt werden. Mit der Einführung der digitalen Datennetze bei den EVU's stehen serielle Verbindungen zwischen allen wichtigen Stationen zur Verfügung. Damit eröffnet sich eine zusätzliche Möglichkeit für die Anwendung des Differenti-

alschutzes. Die Schnittstellen, Protokolle und Prozeduren für den Informationsaustausch zwischen Schutzgerät und Datenübertragungseinrichtung müssen dabei genau abgestimmt sein und den jeweiligen Standards entsprechen (offene Kommunikation). Bei Übertragung der Daten im Multiplexbetrieb mit anderen Diensten ist zusätzlich das Zeitverhalten des Datenkanals, zum Beispiel bei Wegumschaltungen, in Betracht zu ziehen. Außerdem ist die Verfügbarkeit des Übertragungssystems generell zu überprüfen.

Der Differentialschutz mit digitaler Kommunikation erhöht die Schutzqualität im Übertragungsnetz, denn die getrennte Messung pro Phase stellt eine streng phasenselektive Abschaltung sicher, als Voraussetzung für eine erfolgreiche einpolige Kurzunterbrechung (KU). Dies gilt auch für schwierige Fehlerfälle, wie zum Beispiel Mehrfachfehler auf Doppelleitungen, wo der Distanzschutz vom Prinzip her an Grenzen stößt. Besonders für die zunehmende Zahl von Dreibeinleitungen ist der digitale Differentialschutz ideal geeignet.

Bei der Anwendung als Sammelschienendifferentialschutz steht die schnelle schieneenselektive Abschaltung in Vordergrund, zur Verhinderung eines größeren Netzausfalls und zur Sicherung der Netzstabilität. Ein Fehlansprechen ist dabei unter allen Umständen zu vermeiden, da dies ebenfalls zu einer größeren Versorgungsunterbrechung führen könnte.

Eine kurze Kommandozeit unter einer Periode und extreme Stabilität gegen Wandlersättigung sind seit längerem Stand der Technik. Die Sicherheit gegen Fehlansprechen bei Hardwarefehlern wird durch UND-Verknüpfung mehrerer unabhängiger Auslösekriterien erreicht.

Bei großen Anlagen besteht häufig eine komplexe Schienenkonfiguration mit zahlreichen Schienenabschnitten, sowie mehreren Trenn- und Kuppelstellen. Dies erfordert eine Vielzahl von Messschaltungen und ein aufwendiges Trennerabbild zur Koordinierung des abschnittswisen Stromvergleichs. Die in konventioneller Technik notwendige Umschaltung der analogen Messwerte wird beim digitalen Sammelschienenschutz durch logische Zuordnung per Softwareabbild erledigt. Der dezentrale, feldbezogene Aufbau und die Kommunikation über LWL reduziert dabei die früher umfangreiche Verdrahtung auf ein Minimum.

Die bisher gemachten Aussagen beziehen sich auf den „normalen“ Stromdifferentialschutz der mit niederohmigen Messrelais arbeitet.<sup>1</sup>

Daneben besteht der Hochimpedanz-Differentialschutz. Bei diesem Verfahren ist das Messrelais im Differentialpfad hochohmig im Vergleich zu der Sekundärimpedanz eines gesättigten Stromwandlers. Damit wird bei durchfließenden Fehlerströmen eine automatische Stabilität gegen Wandlersättigung erreicht. Der Strom der nicht gesättigten Wandler fließt in diesem Fall nämlich nicht über das Messrelais, sondern über den gesättigten Wandler, der als niederohmiger Shunt wirkt.

Dieses Verfahren wird in Übersee vielfach eingesetzt für galvanisch verbundene Stromkreise, hauptsächlich als Maschinen- und Sammelschienenschutz, aber auch

---

<sup>1</sup> Bei digitalen Relais existiert der Differentialkreis nur noch als Software. Das Verhalten des digitalen Differentialschutzes entspricht aber dem Niedrig-Impedanz-Messprinzip.

als Nullstromdifferentialschutz für Transformatoren (restricted earth fault protection).

Das Verfahren erfordert besonders ausgelegte Wandler (Klasse PX nach IEC 60044-1) mit gleichem Übersetzungsverhältnis.

Beim inneren Fehler, wo alle Wandler auf das hochohmige Relais speisen, entstehen hohe Spannungsspitzen im Wandlersekundärkreis, die mit einem Varistor begrenzt werden müssen. Für den Schutz von Mehrfachsammlerschienen ist dieses Verfahren weniger geeignet, weil die Wandlersekundärströme direkt umgeschaltet werden müssen. Für einfache Anlagen mit Zweifachschienen werden dafür im Ausland die Trennerhilfskontakte selbst benutzt. Der Hochimpedanzdifferentialschutz wird aber hauptsächlich dort eingesetzt, wo kein Trennerabbild erforderlich ist, zum Beispiel für 1-1/2-Leistungsschalter-Anlagen.

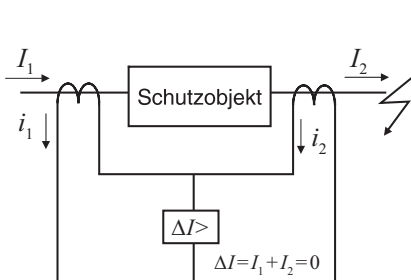
## 3.2 Grundprinzipien

Die grundlegenden Verfahren sind schon seit Jahrzehnten bekannt und bleiben unabhängig von der jeweiligen Gerätetechnologie gültig [3-1, 3-2].

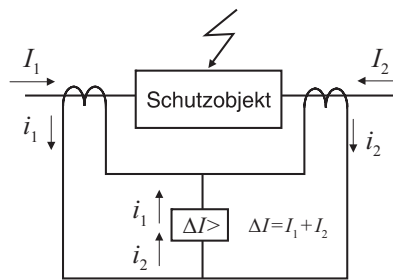
Der Differentialschutz vergleicht die Messwerte nach Größe und Phasenlage. Dies kann durch direkten Vergleich der Momentanwerte geschehen oder durch Vergleich der Zeiger-(Vektor-)Größen. In jedem Fall basiert das Verfahren auf der Kirchhoffschen Regel, die besagt, dass die geometrische Summe der Ströme an einem Knotenpunkt (für einen Schutzbereich) zu jedem Zeitpunkt Null sein muss. Wir verwenden dabei die Definition, dass die auf den Schutzbereich zufließenden Ströme positiv und die abfließenden Ströme negativ gezählt werden.

### 3.2.1 Strom-Differentialschutz

Dies ist die einfachste, und am häufigsten angewendete Form des Differential-schutzes. Die Grundschialtung zeigt Bild 3.1. Die Stromwandler an den Enden des Differentialschutz-Bereichs sind sekundärseitig in Reihe geschaltet, so dass sich die Ströme beim äußeren Fehler gegenseitig absaugen (Bild 3.1a) und kein Strom über den Differentialzweig fließt, in dem sich das Differentialrelais befindet. Bei einem innen liegenden Fehler (Bild 3.1b) fließen die Kurzschlussströme auf die



**Bild 3.1a** Äußerer Fehler oder Last

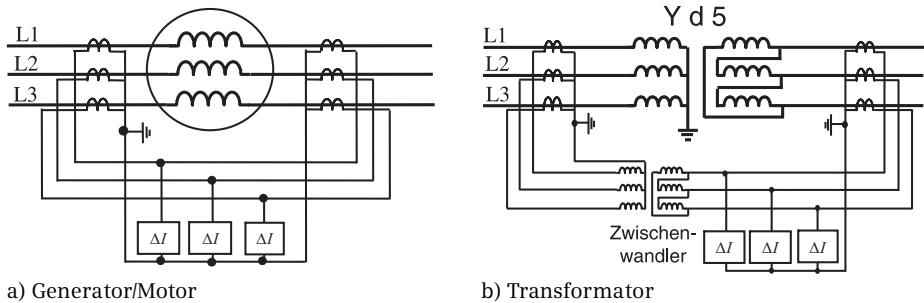


**Bild 3.1b** Innerer Fehler

Fehlerstelle zu und die Sekundärströme addieren sich im Differentialzweig. Damit spricht das Differentialrelais an und löst aus.

Diese einfache Grundschaltung (unstabilisierter Strom-Differentialschutz) ist bei allen konzentrierten Schutzobjekten anwendbar, wo die Wandler räumlich nahe zusammen liegen.

Die einfachste Anordnung ergibt sich bei einem Generator oder Motor (Bild 3.2a), besonders wenn die Stromwandler gleiche Übersetzung haben.

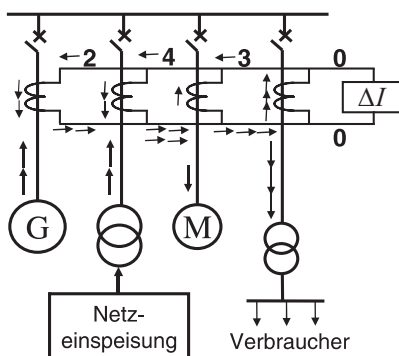


**Bild 3.2** Differentialschutz, Dreiphasige Grundausführung

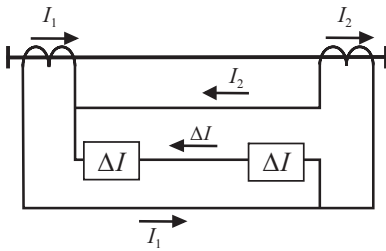
Beim Transformator sind für den Vergleich Stromzwischenwandler erforderlich, die die Übersetzung und Schaltgruppe des Transformators ausgleichen (Bild 3.2b).

Beim Sammelschienendifferentialschutz sind die Ströme von mehreren Abzweigen zu summieren (Bild 3.3). Bei Last und bei äußeren Fehlern ist die geometrische Summe der Abzweigströme Null und es fließt kein Differenzstrom im Relais. Beim inneren Fehler addieren sich die Ströme jedoch zu einem großen Differenzstrom.

Beim Differentialschutz für eine Leitung liegen die Stromwandler der beiden Enden des Schutzbereichs weit auseinander. In diesen Fall verwendet man die



**Bild 3.3**  
Sammelschienenschutz  
(Stromverteilung bei Last)



**Bild 3.4**  
Leitungsdifferentialschutz

Grundschtung nach Bild 3.4 (Dreieradernschutz). Es werden dabei für die Verbindung von Station zu Station drei Hilfsadern benötigt, die normalerweise als ein „Aderdreier“ in einem Signalkabel verlegt sind. In der Differentialader sind an beiden Leitungsenden Stromdifferentialrelais vorgesehen, die beim inneren Fehler jeweils den Leistungsschalter in ihrer Station auslösen. Damit ist keine zusätzliche Kommandoübertragung von Station zu Station erforderlich. In der Praxis werden die Wandlersekundärströme (1 bzw. 5 A) über Zwischenwandler auf 100 mA herabgesetzt und so der Leistungsverbrauch auf den Hilfsadern reduziert. Durch die damit verringerte Wandlerbürde kann der Stromdifferentialschutz bis zu Entfernungen von etwa 10 km betrieben werden. Bei kurzen Entfernungen von 1 bis 2 km können Steuerkabel (2 kV Prüfspannung) benutzt werden.

Bei der Verlegung der Hilfsadern in der Nähe von Leistungskabeln oder Freileitungen ist allerdings eine gute Schirmung gegen die Beeinflussung durch Erdkurzschlussströme notwendig. Bei längeren Strecken kann dabei Hochspannung von mehreren kV an den Hilfsadern induziert werden. Diese beansprucht die Isolation der Hilfsadern gegen Erde und erfordert dann spezielle Hilfskabel mit erhöhter Isolation (z. B. 8 kV) und unter Umständen Abriegelungswandler zum Fernhalten der Hochspannung von den Schutzgeräten (siehe Abschnitt 6.1.1).

Zur Verminderung der Zahl der benötigten Hilfsadern werden die Zwischenwandler außerdem als Mischwandler ausgeführt, wobei die Leiterströme zu einem einphasigen Mischstrom zusammengefasst werden.

#### *Stromvergleich mit digitaler Messwertübertragung*

Das Prinzip des Stromdifferentialschutzes wurde bisher für den klassischen Fall der Messwertübertragung mit Drahtverbindungen erläutert.

Beim digitalen Schutz wird zunehmend auch die serielle Datenübertragung genutzt.

Dabei werden die Messwerte digital codiert übertragen über direkt zugeordnete Lichtwellenleiter oder über ein digitales Datennetz. Trotz der digitalen Messwertübertragung und -verarbeitung bleibt das Grundprinzip jedoch erhalten.

Beispiele für die Anwendung sind der digitale Leitungsdifferentialschutz 7SD52/61 und der dezentral aufgebaute digitale Sammelschienenschutz 7SS52.

### Querdifferentialschutz

Die oben beschriebenen Vergleichsschaltungen werden auch als „Längsdifferentialschutz“ bezeichnet. Zur Vollständigkeit sei erwähnt, dass früher auch ein Querdifferentialschutz eingesetzt wurde. Er verglich die Ströme am Ende von zwei oder mehreren parallel geschalteten Leitungen und war unter den Namen „Achter- und Polygonschutz“ bekannt [A-19]. Diese Schutzart wird heute praktisch nicht mehr verwendet, vor allem weil die Leitungen bei diesem Verfahren immer parallel geschaltet sein müssen und nicht unabhängig betrieben werden können.

Bei Maschinen mit parallelen Wicklungen wird dagegen der Querdifferentialschutz zur Erfassung von Windungsschlüssen nach wie vor eingesetzt (siehe Abschnitt 7.1).

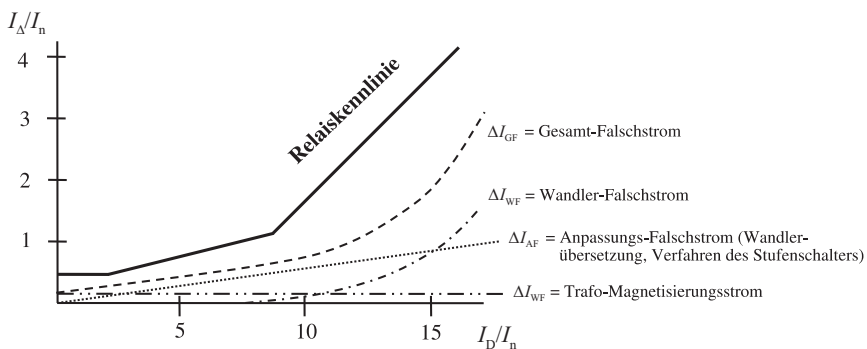
### 3.2.2 Stabilisierter Differentialschutz

Bisher wurde für das Relais im Differentialpfad zur Vereinfachung ein konstanter Ansprechwert angenommen.

Es muss im praktischen Anwendungsfall jedoch mit einem falschen Differenzstrom gerechnet werden, der durch Übertragungsfehler der Stromwandler verursacht wird. Er steigt im linearen Bereich der Wandler proportional mit dem Durchgangsstrom an. Bei großen Kurzschlussströmen kann es dann abrupt zur Wandler sättigung und zu einem steilen Anstieg des Falschstromes kommen.

Bei Regeltransformatoren muss zusätzlich mit einem Falschstrom gerechnet werden, der bei Verstellung des Stufenschalters entsteht.

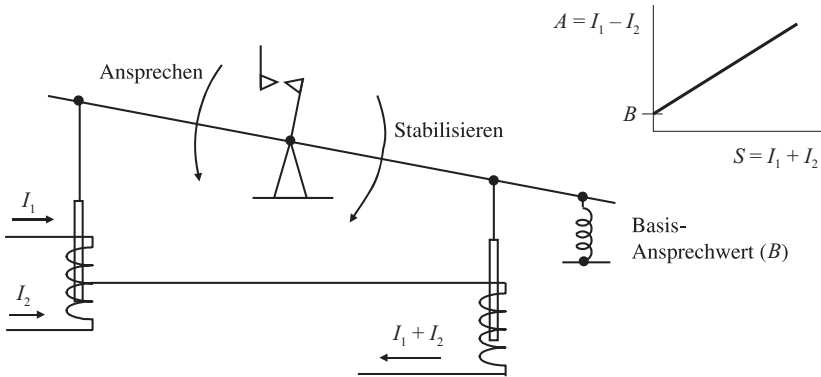
In Bild 3.5 ist der vom Relais gemessene Differenzstrom dargestellt in Abhängigkeit von dem Durchgangsstrom  $I_D$  bei Last oder externem Fehler.



**Bild 3.5**

Falscher Differenzstrom bei Last und Durchgangsfehlern und angepasste Relaiskennlinie

Man erkennt, dass es sinnvoll ist, das Ansprechniveau mit steigendem Durchgangsstrom anzuheben. Damit ergibt sich eine hohe Ansprechempfindlichkeit bei Last und kleinen Kurzschlussströmen, und andererseits eine verbesserte Stabilität gegen Fehlauflösung bei großen Strömen, wo Wandlersättigung zu erwarten ist.



**Bild 3.6** Prozentrelais nach McCroll

In den Anfängen der Schutztechnik wurde dies durch eine Anhebung der Ansprechkennlinie proportional mit dem Durchgangsstrom realisiert. Diese Methode wurde bereits 1920 vorgeschlagen und wurde unter dem Namen Prozentrelais bekannt [3-1, 3-2]. Bild 3.6 zeigt den prinzipiellen Aufbau.

Diese Methode wurde später in elektromechanischer und statischer Technologie als Gleichrichterbrückenschaltung realisiert (Bild 3.7). Als Messglied diente ein polarisiertes Drehspulrelais mit hoher Empfindlichkeit, beziehungsweise eine entsprechende elektronische Triggerschaltung.

Stabilisierend (als Rückhaltung) wirkt die Größe  $\underline{I}_S = k_1 \cdot (\underline{I}_1 - \underline{I}_2)$  die der „Summe“ der Wandlerströme beim durchfließenden Strom entspricht. Dabei ist zu beachten, dass die gewählte Vorzeichenregel die Ströme positiv zählt, wenn sie in den Schutzbereich hineinfließen.

Auslösend wirkt die „Differenz“ der Wandlerströme  $\underline{I}_A = k_2 \cdot (\underline{I}_1 + \underline{I}_2)$ .

Es ergeben sich also folgende Zustände:

	$\underline{I}_S = (\underline{I}_1 - \underline{I}_2)$	$\underline{I}_A = (\underline{I}_1 + \underline{I}_2)$
Äußerer Fehler	$\underline{I}_S = 2 \cdot \underline{I}_K$	$\underline{I}_A = 0$
Innerer Fehler mit einseitiger Einspeisung	$\underline{I}_S = \underline{I}_K$	$\underline{I}_A = \underline{I}_K$
Innerer Fehler mit zweiseitiger Einspeisung	$\underline{I}_S = 0$	$\underline{I}_A = 2 \cdot \underline{I}_K$

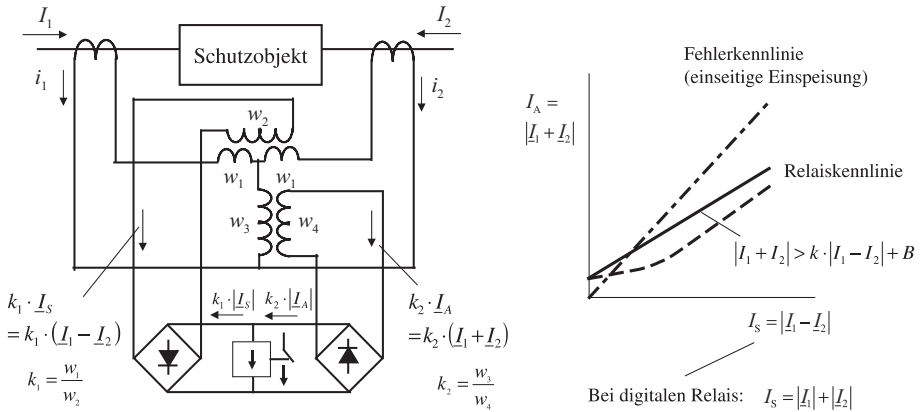
Als Ansprechkriterium gilt:

$$\underline{I}_A > k \cdot \underline{I}_S \quad \text{das heißt} \quad |\underline{I}_1 + \underline{I}_2| > k \cdot |\underline{I}_1 - \underline{I}_2| \quad \text{mit} \quad k = k_1/k_2$$

Durch eine Rückzugsfeder am Ansprechrelais kann noch ein Mindestansprechwert  $B$  eingeführt werden.

Damit erhalten wir als Grundformel für den stabilisierten Stromdifferentialschutz:

$$\underline{I}_A > k \cdot \underline{I}_S + B \tag{3-1}$$



**Bild 3.7** Differentialschutz mit Gleichstrombrückenschaltung als Messglied

Später wurde die Messschaltung noch verfeinert und durch eine zusätzliche Dioden-Widerstandskombination erweitert. Damit wurde erreicht dass die Stabilisierung bei kleinen Strömen nur schwach einsetzt, und erst ab einem Schwellwert stark ansteigt (gestrichelt gezeichnete Kennlinie in Bild 3.7). In digitaler Technik wurde dann eine Kennlinie realisiert die aus mehreren Abschnitten besteht. Sie lässt sich besser an den auszugrenzenden Falschstrombereich anpassen (siehe Bild 3.5).

Der Schwellwert  $B$  wird bei neueren Schutzeinrichtungen nicht mehr auf der Stabilisierungsseite addiert, sondern als getrennt einstellbares Kriterium  $I_A > B$  realisiert. Damit ist die stabilisierte Kennlinie  $I_A > k \cdot I_S$  nicht mehr um den Anfangswert  $B$  verschoben, sondern verläuft durch den Koordinatenursprung. Dies ermöglicht eine erhöhte Empfindlichkeit bei kleinen Strömen, ähnlich wie bei der gestrichelten Kennlinie in Bild 3.7 (siehe Bild 3.14 im folgenden Abschnitt).

Das beschriebene Messprinzip lässt sich auch auf Schutzobjekte mit mehr als zwei Enden (Dreiwicklungstransformator, Sammelschienenschutz) ausdehnen. Dabei wird für die Stabilisierung die Summe der Strombeträge (arithmetische Summe) benutzt<sup>1</sup> und für die Auslösung der Betrag der geometrischen (vektoriellen) Stromsumme:

$$I_S = |I_1| + |I_2| + |I_3| + \dots + |I_n| \quad (3-2)$$

$$I_A = |I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n| \quad (3-3)$$

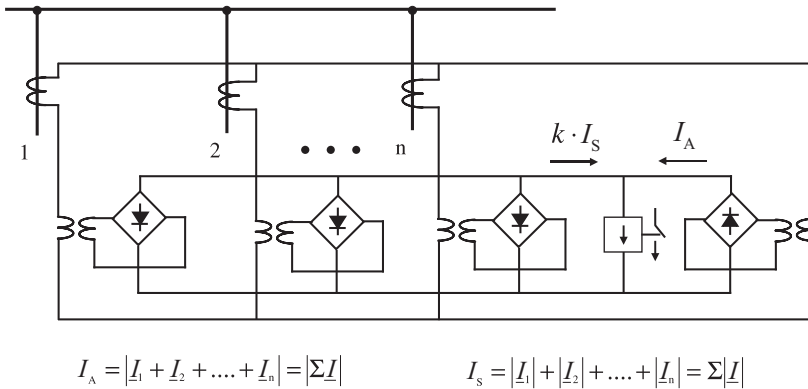
Als Ansprechkriterium gelten die bereits oben erläuterten Bedingungen:

$$I_A > k \cdot I_S \quad \text{und} \quad I_A > B \quad (3-4)$$

Der Stabilisierungsfaktor ist einstellbar und variiert in einem Bereich von  $k = 0,3$  bis  $0,8$ , abhängig von der Anwendungsart und der Auslegung der Stromwandler.

<sup>1</sup> Bei digitalen Relais wird auch beim Zwei-Enden-Differentialschutz diese Formel angewendet.





**Bild 3.8** Mehrendifferentialschutz, Prinzip

Der Schwellwert  $B$  kann bei einem Generator auf  $10\% I_n$  eingestellt sein, während bei einem Sammelschienenschutz ein Wert von  $130\%$  des maximalen Abgangsstroms üblich ist. Darauf wird bei der Diskussion der einzelnen Schutzeinrichtungen eingegangen. Die entsprechende Schaltung mit analoger Messwertverarbeitung zeigt Bild 3.8. Der Betragsbildung entspricht dabei die Gleichrichtung.

Beim äußeren Fehler muss der Auslösestrom  $I_A$  Null sein, das heißt, die Stromzeiger müssen sich zu Null addieren. Der Stabilisierungsstrom entspricht der Summe der Strombeiträge.

Beim inneren Fehler ergibt sich der Auslösestrom als die Summe der Stromzeiger. Im einfachsten Fall, wenn die Einspeisequellen, und deswegen auch die Kurzschlussströme alle annähernd in Phase liegen, sind die Vektor- und die Betragssumme gleich, das heißt,  $I_A = I_S$ <sup>1</sup>.

Im Normalfall (niederohmiger Kurzschluss und phasengleiche Einspeisungen) erhalten wir folgende Übersicht:

Äußerer Fehler	$I_S = 2 \cdot I_{KD}$	$I_A = 0$	$I_{KD}$ ist der durch den Schutzbereich fließende Kurzschlussstrom
Innerer Fehler	$I_S = I_K$	$I_A = I_K$	$I_K$ ist der Summenkurzschlussstrom an der Fehlerstelle

Bei inneren Fehlern mit größeren Übergangswiderständen muss allerdings damit gerechnet werden, dass auch während des Fehlerzustandes ein Teil der Last durch die Anlage hindurch fließen kann. Es kommt zu einer Überlagerung der nach innen fließenden Kurzschlussströme und der durchfließenden Lastströme. Damit reduziert sich das Verhältnis  $I_A/I_S$  entsprechend.

<sup>1</sup> Bei einer Reihe von Herstellern entspricht dem Stabilisierungsstrom  $I_S$  nur die Hälfte der Stromsumme:  $I_S = (|I_1| + |I_2| + \dots + |I_n|)/2$ . Damit gilt beim äußeren Fehler  $I_S = I_{KD}$  und beim inneren Fehler  $I_S = I_K/2$ . Dies ist beim Vergleich der Relais und bei der Einstellung der Stabilisierungsfaktoren zu beachten.

**Beispiel 3.1:**

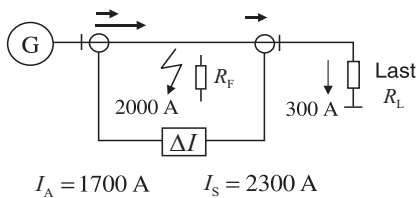
Kurzschluss mit Übergangswiderstand (Bild 3.9)

$$I_A = 2300 - 300 = 2000$$

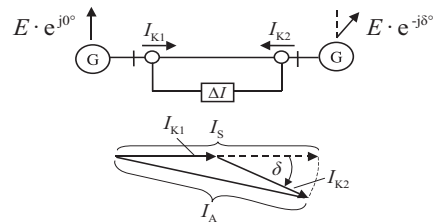
$$I_S = 2300 + 300 = 2600$$

$$I_A/I_S = 0,77$$

In ausgedehnten Übertragungsnetzen, oder wenn Kraftwerke pendeln oder gar außer Tritt fallen, kann es jedoch zu größeren Winkelverschiebungen kommen, bei den auf die Fehlerstelle zufließenden Strömen. In diesem Fall ist die vektorielle Stromsumme kleiner als die Betragssumme und deswegen  $I_A < I_S$ . Für den Fall einer zweiseitigen Einspeisung ergeben sich die Verhältnisse gemäß Bild 3.10.



**Bild 3.9** Innerer Fehler mit Übergangswiderstand, Stromverteilung



**Bild 3.10** Innerer Fehler mit phasenverschobenen Einspeisungen

Wenn wir zur Vereinfachung die beiden Ströme gleich groß annehmen, dann ergibt sich:

$$I_S = 2 \cdot |I_k| \quad \text{und} \quad I_A = 2 \cdot |I_k| \cdot \cos \frac{\delta}{2}$$

Bei  $\delta = 30^\circ$  ergibt sich damit ein Verhältnis von  $I_A/I_S = 0,87$ .

Die betrachteten Effekte können sich natürlich auch addieren. Der Stabilisierungsfaktor sollte deshalb nicht über 0,8 eingestellt werden. Die Wandler sollten vielmehr so ausgelegt werden, dass eine Einstellung über 0,7 nicht notwendig ist.

### 3.2.3 Differentialschutz mit zwei Hilfsadern

Zur Nutzung von Nachrichtenkabeln mit verdrehten Adernpaaren (Telefonadern) wurde der Zweiadern-Differentialschutz (pilot wire differential protection) entwickelt. Er wird vor allem im Ausland eingesetzt, wo die Adernpaare auch von Telefongesellschaften gemietet werden.

Es sind grundsätzlich zwei Varianten möglich:

- Spannungsvergleichsprinzip (opposed voltage principle)
- Kreisstromprinzip (circulating current principle)

Beide Varianten wurden realisiert und sind in der Praxis im Einsatz [A-13, A-20]. Die Relais von Siemens, die in Abschnitt 9.2 ausführlich behandelt werden, arbeiten nach dem Spannungsvergleichsprinzip.

Spannungsvergleich

Bei diesem Verfahren wird der Strom an jedem Leitungsende über einen Shuntwiderstand ( $R_Q$ ) geschickt und so jeweils eine stromproportionale Spannung  $U_1$  bzw.  $U_2$  erzeugt. Diese beiden Spannungen werden dann über das Hilfsadernpaar verglichen. Der Anschluss wird so gewählt dass sich die Spannungen bei durchfließendem Last- oder Fehlerstrom entgegenstehen und auf der Hilfsader kein Strom fließt. Beim innerem Fehler liegen die beiden Spannungen dagegen in Reihe und treiben einen Strom über die Hilfsadern, der zur Auslösung der empfindlichen Stromrelais ( $\Delta I$ ) führt. Dieser Auslösestrom beträgt, bezogen auf Nennstrom der Wandler, nur einige mA.

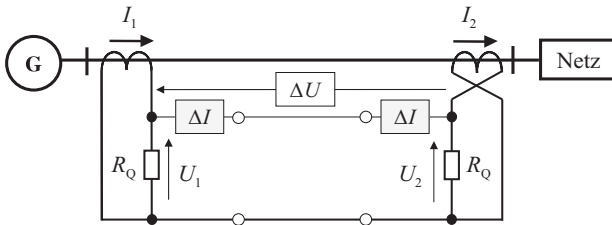


Bild 3.11 Leitungsdifferentialschutz, Prinzip Spannungsvergleich

Die Spannung an den Hilfsadern beträgt bei Nennstrom der Wandler nur wenige Volt, steigt aber bei großen Kurzschlussströmen entsprechend an. Die maximale Querspannung an den Adern darf allerdings nicht mehr als 60% der Prüfspannung des Telefonkabels (500 V) betragen, das heißt 300 V. Für die Begrenzung der Spannung bei hohen inneren Fehlerströmen ist ein Varistor vorgesehen. Bei äußeren Fehlern sollte die Begrenzungsspannung aber nicht erreicht werden. Die leistungsarme Auslegung der Geräte erlaubt eine maximale Streckenlänge von etwa 25 km.

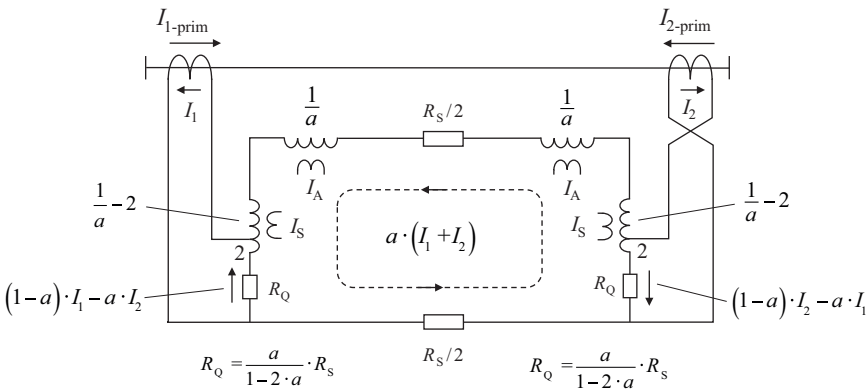


Bild 3.12 Zwei-Adern-Differentialschutz, Variante Spannungsvergleich

Bezüglich Isolation und Schirmung der Hilfsadern gelten prinzipiell die in Abschnitt 3.2.1 zum Dreiaerdifferentialschutz gemachten Aussagen.

Zusätzlich ist eine gute Verdrellung des Adernpaares notwendig, damit die durch Erdkurzschlussströme induzierte Querspannung, die die Messung beeinflusst, niedrig gehalten wird. Darauf wird in Abschnitt 6.1.1 ausführlich eingegangen.

Die in der Praxis eingesetzte Messschaltung ist als stabilisierter Differentialschutz ausgeführt. Der Auslösestrom  $I_A = I_1 + I_2$ <sup>1</sup> ist dabei proportional dem Hilfsadernstrom. Der Stabilisierungsstrom  $I_S = I_1 - I_2$  wird gewonnen aus dem Strom im Querzweig mit einem Zusatzanteil aus dem Hilfsadernstrom (Bild 3.12).

Das Verhältnis von Querwiderstand  $R_Q$  zu  $m$  Schleifenwiderstand  $R_S$  bestimmt den Stromverteilungsfaktor  $a$ , d. h. das Verhältnis von Adernstrom zu Gesamtstrom  $I_1 + I_2$ . Dabei ist  $R_S$  durch den Schleifenwiderstand der Hilfsadern vorgegeben.  $R_Q$  wird am Relais eingestellt, so dass sich das vorgegebene Verhältnis  $a$  ergibt:

$$R_Q = \frac{a}{1 - 2 \cdot a} \cdot R_S \quad (3-5)$$

Zur Bildung von  $I_A$  und  $I_S$  sind die Adern- und Querströme im Relais mit den geeigneten Gewichtungsfaktoren zu addieren. Dies geschieht beim analogen Schutz über interne Zwischenwandler mit entsprechenden Anzapfungen (Bild 3.12):

$$I_A = \frac{1}{a} \cdot [a \cdot (I_1 + I_2)] = I_1 + I_2 \quad (3-6)$$

$$I_S = 2 \cdot [(1 - a) \cdot I_1 - a \cdot I_2] - \left(\frac{1}{a} - 2\right) \cdot [a \cdot (I_1 + I_2)] = I_1 - I_2 \quad (3-7)$$

Beim den konventionellen Relais von Siemens wurde mit der Einstellung immer auf den festen Wert  $a = 1/8$ , was heißt  $R_Q = 1/6 R_S$  abgeglichen (siehe Abschnitt 9.2, Bild 9.2).

Beim digitalen Schutz ist der Abgleich nicht mehr erforderlich. Die Stromverteilung wird in jedem Anwendungsfall aus dem einzugebenden Wert für  $R_S$  und dem im Relais fest vorgegebenen Wert  $R_Q$  individuell berechnet. Dies wird in Abschnitt 9.2 ausführlich erläutert.

### Kreisstromverfahren

Die Schaltung ist wie beim Spannungsvergleichsverfahren aufgebaut, es sind jedoch Auslösung und Stabilisierung vertauscht. Der Hilfswandler in der Adernschleife liefert jetzt  $I_S = I_1 - I_2$  und der Hilfswandler am Querzweig  $I_A = I_1 + I_2$ . Die Stromwandler sind gegensinnig an die Hilfsadern angeschlossen, wie beim üblichen Differentialschutz, das heißt die in Bild 3.12 bei dem rechten Wandler gezeigte Kreuzung der Anschlüsse entfällt. Damit liegen die Sekundärspannungen der Stromwandler beim durchfließenden Leitungsstrom in Reihe und treiben einen Kreisstrom durch die Hilfsadernschleife. Beim inneren Fehler stehen beide

<sup>1</sup> Es ist die Vorzeichenregel zu beachten: In die Leitung hinein fließende Ströme werden positiv gezählt.