



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorthesis

Martin Emil Weichert

Entwicklung einer Simulationssoftware für  
dreipolige Kurzschlüsse in Schiffsbetriebsanlagen  
mit grafischer Bedienoberfläche

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Informations- und  
Elektrotechnik*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Information and  
Electrical Engineering*

Martin Emil Weichert

Entwicklung einer Simulationssoftware für  
dreipolige Kurzschlüsse in Schiffsbetriebsanlagen  
mit grafischer Bedienoberfläche

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. -Ing. Michael Röther  
Zweitgutachter : Prof. Dr. -Ing. Ingo Winzenick

Abgegeben am 18. März 2015

**Martin Emil Weichert**

**Thema der Bachelorthesis**

Entwicklung einer Simulationssoftware für dreipolige Kurzschlüsse in Schiffsbetriebsanlagen mit grafischer Bedienoberfläche

**Stichworte**

Kurzschluss, Kurzschluss-Berechnung, IEC 61363-1, Schiffsbetriebsanlagen, Kurzschluss-Simulation, Energietechnik

**Kurzzusammenfassung**

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Berechnung von Kurzschlussströmen auf Schiffsbetriebsanlagen vorgestellt. Dieses richtet sich nach der themeneigenen Norm IEC 61363-1. Die Berechnung wird in eine SPS-Umgebung integriert; Bauteile und die Berechnungsalgorithmen werden implementiert.

**Martin Emil Weichert**

**Title of the paper**

Development of a simulation software for three-pole short circuits on ship systems with graphical user interface

**Keywords**

short circuit, short circuit calculation, short circuit simulation, IEC 61363-1, ship systems, energy management

**Abstract**

This report describes the development of a short circuit calculation software. The software is based on standard IEC 61363-1 for ships and offshore units. All components and mathematic algorithms are implemented on a stored program control (SPC) surface.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich zunächst Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Röther danken, der dieses Thema als Erstprüfer betreute. Er hat bei Fragen oder Problemen stets Zeit für ein persönliches Gespräch gefunden und sehr viel Interesse am Thema gezeigt hat.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Winzenick, der sich nach einer kurzen Vorstellung des Themas der Bachelorarbeit bereiterklärt hat, die Rolle des Zweitprüfers zu übernehmen.

Weiterhin danke ich meinem Betreuer Dipl.Ing. Hermann Knirsch der mich tatkräftig bei der Bewältigung von Problemen unterstützt hat.

Meinen Eltern und meinem Bruder möchte ich danken, die mich durch mein gesamtes Studiums unterstützte haben.

Schließlich danke ich meiner Lerngruppe die mich jederzeit immer wieder motivierte hat und mit der kein Ziel unerreicht blieb.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>8</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>9</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>11</b>
1.1 Aufgabenstellung . . . . .	11
1.2 Zielsetzung . . . . .	12
1.3 Gliederung . . . . .	13
<b>2 Grundlagen</b>	<b>14</b>
2.1 Kurzschluss . . . . .	14
2.1.1 Generator-naher Kurzschluss . . . . .	15
2.2 Kurzschlussfestigkeit . . . . .	15
2.2.1 Mechanisch . . . . .	15
2.2.2 Thermisch . . . . .	16
2.3 Kurzschlussfehler . . . . .	17
2.3.1 Erdschluss . . . . .	18
2.3.2 Zweipoliger Kurzschluss . . . . .	18
2.3.3 Dreipoliger Kurzschluss . . . . .	18
2.4 Zusammensetzung des Gesamtkurzschlussstroms . . . . .	19
2.4.1 Subtransiente Phase . . . . .	21
2.4.2 Transiente Phase . . . . .	21
2.4.3 Stationäre Phase . . . . .	21
2.5 Kurzschlüsse schalten . . . . .	21
2.5.1 Leistungsschalter . . . . .	21
2.5.2 Einfluss der Abschaltgeschwindigkeit . . . . .	22
<b>3 Berechnungstheorie</b>	<b>23</b>
3.1 Symmetrischer Kurzschluss . . . . .	23
3.1.1 einfache Einspeisung . . . . .	23
3.1.2 mehrfache Einspeisung . . . . .	24
3.2 Kurzschlussberechnung nach IEC 61363-1 . . . . .	24
3.2.1 Synchrongenerator . . . . .	24

---

3.2.2	Asynchronmotoren . . . . .	26
3.2.3	Transformator . . . . .	28
3.2.4	Umrichter . . . . .	29
3.2.5	Leitungen und Spulen . . . . .	32
3.2.6	Erzeugen von Ersatzmotoren . . . . .	34
3.3	Erzeugen von Ersatzgeneratoren . . . . .	36
3.3.1	Bestimmen von $I_{ac}(t)_*$ . . . . .	36
3.3.2	Bestimmen der Zeitkonstante $T''_{d*}$ . . . . .	37
3.3.3	Ermitteln der Zeitkonstante $T'_{d*}$ . . . . .	37
3.3.4	Ermitteln der Gleichspannungskonstanten $T_{dc*}$ . . . . .	38
3.3.5	Bestimmen der Impedanz des Ersatzgenerators . . . . .	38
3.4	Vereinfachungen durch Norm . . . . .	39
3.4.1	Große Motoren . . . . .	39
3.4.2	Kleine Motoren . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Implementierung</b> . . . . .	<b>42</b>
4.1	Aufbau und Funktion von Bauteilen . . . . .	42
4.2	Bauteile . . . . .	43
4.2.1	Generator . . . . .	44
4.2.2	Motor . . . . .	45
4.2.3	Motoren Gruppen . . . . .	46
4.2.4	Umrichter . . . . .	46
4.2.5	Widerstände und Spulen . . . . .	47
4.2.6	Transformatoren . . . . .	48
4.2.7	Sammelschiene und Kurzschluss . . . . .	48
4.3	Simulationsalgorithmus . . . . .	49
4.3.1	Programmablauf . . . . .	49
4.3.2	Berechnungsreihenfolge und Berechnung . . . . .	50
4.3.3	Zusammenfassen von Bauteilen . . . . .	51
4.3.4	Funktionsweise der unidirektionalen Bauteilen . . . . .	53
4.4	Ausgabe- und Dokumentationsmöglichkeit . . . . .	54
4.4.1	Kurzschluss . . . . .	54
4.4.2	Ersatzgenerator . . . . .	55
4.4.3	Dokumentation . . . . .	56
<b>5</b>	<b>Verifizierung</b> . . . . .	<b>58</b>
5.1	Beispiel . . . . .	58
5.1.1	Aufgabe . . . . .	58
5.1.2	Berechnung Synchrongenerator . . . . .	58
5.1.3	Zusammenfassen von Synchrongenerator und Leitung . . . . .	60
5.1.4	Zusammenfassen mit Transformator . . . . .	62
5.2	Vergleich zu anderen Programmen . . . . .	65

---

5.2.1	Excel-Berechnungstabelle . . . . .	65
5.2.2	Siemens Sincal . . . . .	67
5.2.3	Simulation mit Simplorer . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>71</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>72</b>
	<b>Variablenverzeichnis</b>	<b>74</b>
	<b>Glossar</b>	<b>77</b>

# Tabellenverzeichnis

2.1	Strombelastbarkeit von Stromschienen . . . . .	16
3.1	Kurzschlussströme Leitung . . . . .	33
5.1	Zeitliche Kurzschlussströme Synchrongenerator . . . . .	61
5.2	Zeitliche Kurzschlussströme Synchrongenerator und Leitung . . . . .	62
5.3	Zeitliche Kurzschlussströme Transformator . . . . .	65

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Kräfteentwicklung in Stromschienen . . . . .	15
2.2	Kurzschlussarten im Dreileitersystem . . . . .	17
2.3	Phasen und Zusammensetzung des Kurzschlussstrom . . . . .	20
3.1	Kurzschlussarten Freileitung . . . . .	23
3.2	Synchrongenerator im System und Ersatzschaltbild . . . . .	24
3.3	Asynchronmotor im System und Ersatzschaltbild . . . . .	27
3.4	Transformator im System und Ersatzschaltbild . . . . .	29
3.5	Wellengenerator mit Umrichter und Blindleistungsmaschine . . . . .	30
3.6	Wellengenerator mit IGBT-Brücke . . . . .	31
3.7	Spannungsverlauf des Umrichters im Normalbetrieb . . . . .	31
3.8	Spannungsverlauf des Umrichters bei Kurzschluss . . . . .	31
3.9	Zeitliches Kurzschlussverhalten des Umrichter . . . . .	32
3.10	Vereinfachtest Ersatzschaltbild einer Leitung . . . . .	33
3.11	Zusammenfassen von mehreren Motoren . . . . .	34
3.12	Zusammenfassen von Motoren und Generatoren . . . . .	36
4.1	Allgemeiner Bausteinaufbau . . . . .	42
4.2	Auswahl der Bausteine . . . . .	43
4.3	Eingabemaske Generator . . . . .	44
4.4	Eingabemaske Motor . . . . .	45
4.5	Eingabemaske Motorengruppe . . . . .	46
4.6	Eingabemaske Umrichter . . . . .	47
4.7	Eingabemaske Widerstand und Spule . . . . .	47
4.8	Eingabemaske Transformator . . . . .	48
4.9	Bauteil Kurzschluss . . . . .	48
4.10	Bauteil Sammelschienen . . . . .	48
4.11	Flussdiagramm Programmablauf . . . . .	49
4.12	Festlegen der Berechnungsreihenfolge . . . . .	50
4.13	Berechnungsbeispiel $G1^*$ , $G2^*$ und $G3^*$ . . . . .	51
4.14	Berechnungsbeispiel $G4^*$ . . . . .	52
4.15	Berechnungsbeispiel $G5^*$ . . . . .	52
4.16	Zusammengefasster Ersatzgenerator $G5^*$ . . . . .	53

---

4.17	Unidirektionale Bausteinproblem . . . . .	53
4.18	Ausgabemaske Kurzschluss . . . . .	54
4.19	Ausgabemaske Ersatzgenerator . . . . .	55
4.20	Dokumentengeneration in Excel aus Delphi . . . . .	57
5.1	Rechenbeispiel: Generator, Leitung, Transformator . . . . .	58
5.2	Excel: Berechnung Generator und Leitung . . . . .	66
5.3	Sincal: Generator, Leitung Transformator . . . . .	67
5.4	Generator, Leitung und ein Transformator die einen Kurzschluss speisen	68
5.5	Simplorermodel einer Synchronmaschine im Kurzschlussfall . . . . .	69
5.6	Simulationsergebnisse aus Simplorer . . . . .	70

# 1 Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung

Für die Konstruktion von modernen Schiffsbetriebsanlagen ist eine im Vorfeld berechnete Kurzschlussrechnung essenziell. Um die Schutzorgane für die Betriebsanlage richtig auslegen zu können. Diese wurde bei der Firma SAM Electronics jahrzehntelang über ein Excel Tabellenprogramm verwirklicht. Dieses Verfahren ist mittlerweile überholt und nicht mehr zeitgemäß. Hieraus leitet sich das Thema dieser Bachelorarbeit ab.

Da im Hause SAM eine SPS-Oberfläche für die allgemeine Programmierung von Schalttafeln und Sicherheitssystem bereits existiert, soll die Kurzschluss-Berechnung in diese implementiert werden. Die dafür benutzte objektorientierte Programmiersprache ist Delphi 5, die sich stark auf graphische Oberfläche konzentriert.

Für die Kurzschlussberechnung wird auf die eigens für Schiffs- und Offshore-Anlagen spezifische Norm IEC 61363-1 zurück gegriffen. In dieser Norm wird auf die Berechnung von Bauteilen sowie mögliche zu treffende Vereinfachungen eingegangen.

Das wesentliche Ziel der Erstellung einer Berechnungssoftware ist, eine klare Aussage über die maximalen Kurzschlussströme treffen zu können. Die Software soll darüber hinaus Grundlagen für die richtige Dimensionierung von Schalttafeln und Schutzorganen bieten. Die Ergebnisse der Simulation sollen in qualifizierter Form dokumentiert werden können.

## 1.2 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Simulationssoftware in eine SPS-Umgebung implementiert, getestet und mit anderen Programmen bzw. Rechenweisen verglichen werden. Dafür werden zunächst die entsprechenden Bauteile wie Generatoren, Motoren, Umrichter, Transformatoren, Leitungen und Sammelschienen in die SPS-Umgebung eingepflegt. Für die Bauteile sollen spezifische Eingabemasken und interne Berechnung erstellt werden. Die Simulationsumgebung muss an die veränderte Berechnungsebene angepasst werden. Das Entwickeln eines entsprechenden Simulationsalgorithmus zum Zusammenfassen mehrere Bauteile bildet einen der Schwerpunkte in dieser Arbeit. Da die Ergebnisse später für Kunden und zur Dokumentation archiviert werden sollten, ist eine Möglichkeit für das Drucken und Speichern von Projekten zu schaffen. Die Dokumentation soll über das Auslagern von Dateien nach Excel verwirklicht werden.

## 1.3 Gliederung

Die Arbeit gliedert sich in mehrere Hauptkapitel. In der Einleitung wird ein Überblick über die Themen der Arbeit vermittelt und wie diese umgesetzt werden sollen.

Das erste Hauptkapitel vermittelt die theoretischen Grundlagen zu Kurzschlüssen, wie die Entstehung, Art und Zusammensetzung.

Das zweite Hauptkapitel behandelt die spezifische Berechnung von Kurzschlussströmen. Diese richtet sich nach der IEC Norm 61363-1.

Kapitel drei beschreibt die Umsetzung der Programmierung in die SPS-Umgebung, das Implementieren der Bauteile, die Berechnungsalgorithmen und Eingabemasken. Des Weiteren werden die Möglichkeiten des Daten-Exports erläutert.

Das vierte Kapitel vergleicht das in dieser Arbeit vorgestellte Vorgehen mit anderen verfügbaren Programmen zur Berechnung von Kurzschlüssen.

Abschließend wird ein Ausblick auf Erweiterungsmöglichkeiten und nächste Schritte gegeben.

# 2 Grundlagen

## 2.1 Kurzschluss

Ein Kurzschluss kann aufgrund unterschiedlicher Ursachen entstehen. Auf diese wird in diesem Kapitel eingegangen.

Generell handelt es sich bei einem Kurzschluss um eine niederohmige Verbindung von mindestens einem spannungsführenden Leiter mit mindestens einem weiteren Leiter. Es gibt eine Vielzahl von möglichen Kurzschlussarten. Diese sind unter anderem abhängig von der Anzahl der beteiligten Leiter, der Entfernung vom Generator und von der Kontaktart der Leiter.

Kurzschlüsse führen im Netz, insbesondere in unmittelbarer Umgebung des Kurzschlussorts, zu hohen Strömen. Diese Ströme können zu starken Absenkungen der Netzspannung führen, welche dann für den regulären Betrieb nicht mehr ausreichen. Um dieses zu vermeiden, werden Netze, in den ein Kurzschluss besteht, in der Regel abgeschaltet. Für das Trennen sind entsprechende Trennstellen vorzusehen, um auftretende Kurzschlussströme zeit- und ortsnah schalten zu können.

Kurzschlussströme verursachen:

- starke magnetische Kräfte zwischen Leitern, damit mechanische Beanspruchung.
- das Erwärmen von Betriebsmitteln bis zur Zerstörung dieser, damit thermische Beanspruchung.
- Lichtbögen, bei denen die unmittelbare Gefahr des Endzündens von organischen Materialien bzw. des Schmelzens von Metallen besteht.
- starke elektromagnetische Beeinflussungen

Bei der Kurzschluss-Berechnung wird der maximale sowie der minimale Kurzschlussstrom ermittelt, um eine Grundlage für die richtige Konzeption von Schaltanlagen zu erhalten. [Schwab, 2006]

### 2.1.1 Generator-naher Kurzschluss

In dieser Arbeit geht es, wie bereits in der Einleitung erläutert, um die Berechnung von Kurzschlüssen in Schiffsbetriebsanlagen. Da das Leitungsnetz auf Schiffen - anders an Land - nur kurz ist, wird für die Kurzschluss-Berechnung mit Generator-nahen Kurzschlüssen gerechnet.

Anders als bei Generator-fernen Kurzschlüssen besteht hier eine stärkere zeitliche Abhängigkeit der Kurzschlussströme ( $I_K'' \neq I_K$ ) durch die geringe Distanz zum Fehlerort. Diese Ströme werden hauptsächlich durch die Reaktanz der Synchrongeneratoren verursacht. Die Impedanz des Synchrongenerators ist im Vergleich zur Netzimpedanz verhältnismäßig groß, sodass die Ausprägung des Stromes stark vom Generator beeinflusst wird. Die Reaktanz wird durch unterschiedliche Phasen beschrieben, auf die an späterer Stelle noch genauer eingegangen wird. Die Reaktanz nimmt mit jeder Phase zu, so dass, besonders in der Anfangsphase, sehr hohe Kurzschlussströme entstehen, die aber schnell wieder abklingen. [Heuck et al., 2010]

## 2.2 Kurzschlussfestigkeit

### 2.2.1 Mechanisch

Ein Leiter, durch den Strom fließt, erfährt eine elektrodynamische Kraft. Im normalen Betrieb von Anlagen ist diese sehr gering, aber im Kurzschlussfall können die auftretenden Kräfte sehr groß werden. Sie müssen bei der Planung von Anlagen unbedingt beachtet werden. Insbesondere bei der Auslegung von Stromschiene, bei deren Befestigung sowie bei der Auslegung ihrer Abstände sind die Kräfte zu berücksichtigen. Bei Nichtbeachtung besteht die Gefahr, dass sich Stromschiene im Kurzschlussfall so sehr verformen, dass sie sich untereinander berühren. Dieses kann weitere Kurzschlüsse verursachen und den Betrieb der Anlage unterbinden.

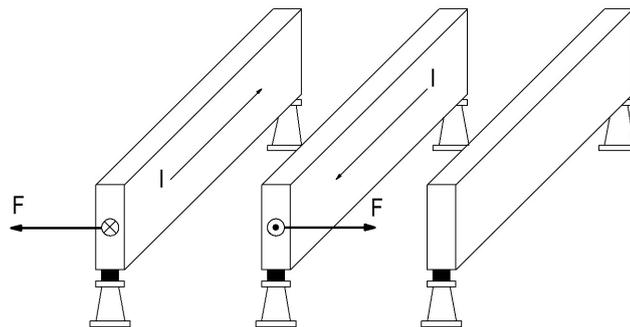


Abbildung 2.1: Kräfteentwicklung in Stromschiene<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bildquelle: [Heuck et al., 2010] (Seite 451)

Für Höchststromanlagen müssten die Stromschienen gegebenenfalls auf mehrere parallele Stromschienen für eine Phase aufgeteilt werden, um zu starke Verformungen auszuschließen. Die Kurzschluss-Berechnung ist wichtig, um die maximal auftretenden Kurzschlussströme und die damit verbundenen maximalen mechanischen Belastungen ermitteln zu können. [Heuck et al., 2010]

### 2.2.2 Thermisch

Neben den starken mechanischen Belastungen beim Kurzschluss ist auch mit thermischer Belastung zu rechnen. Über die gesamte Kurzschlussdauer darf die Temperatur in den Betriebsmitteln nicht die zulässigen Temperatur überschreiten. Jedes Betriebsmittel hat eine unterschiedliche Temperaturentwicklung, abhängig von z. B. Bauform, Größe oder Kapselung. Diese werden generell vom Hersteller ermittelt bzw. in der DIN VDE 0102 und 0103 beschrieben. In Schiffsbetriebsanlagen sind vor allem die Stromschienen gesondert zu betrachten, da sich hier die größten Auswirkungen der thermischen Verformung ergeben. In den meisten Fällen bestehen Stromschienen aus Kupfer. Kupfer hat die Eigenschaft, bei Temperaturerhöhungen zu fließen. Dies stellt eine besondere Herausforderung für die Befestigungen dar. Befestigungen müssen die Ausdehnung und Verformung zwischen kaltem Zustand, Normalzustand und im Kurzschlussfall kompensieren können. Dies wird durch gesonderte gefederte Befestigungen realisiert.

Die Strombelastbarkeit wird neben der Temperatur über die Anordnung der Stromschienen, die Anzahl der Schienen und ob diese blank oder beschichtet sind, beeinflusst. Aus der DIN 43671 wird hier ein Beispiel für eine Umgebungstemperatur von 45 °C und eine Betriebstemperatur der Schienen von 90 °C dargestellt. [Heuck et al., 2010]

**Tabelle 2.1:** Strombelastbarkeit von Stromschienen

Breite×Dicke [mm <sup>2</sup> ]	Maximal zulässige Strombelastbarkeit [A] bei 50/60 Hz							
	gestrichen(matt-schwarz)				blank			
	Anzahl der Schienen				Anzahl der Schienen			
	1	2	3	4	1	2	3	4
15 × 3	230	390	470	–	200	350	445	–
20 × 5	395	690	900	–	340	620	855	–
20 × 10	615	1145	1635	–	530	1020	1460	–
25 × 5	475	820	1040	–	405	725	985	–
30 × 5	555	940	1170	–	470	830	1110	–
40 × 10	1050	1820	2480	3195	885	1600	2195	2825
100 × 10	2240	3530	4610	5615	1845	3075	4040	4935
120 × 10	2615	4060	5290	6360	2155	3545	4635	5580

## 2.3 Kurzschlussfehler

In elektrischen Anlagen können unterschiedliche Arten von Kurzschlüssen auftreten. Dabei sind verschiedenste Kriterien zu beachten wie:

- Dauer
  - selbstlöschender Kurzschluss
  - flüchtiger Kurzschluss
  - Dauerkurzschluss
- Entstehung
  - Mechanisch, beispielsweise durch Leiterbrüche
  - Elektrische Überspannung
  - Isolation

Da sich diese Arbeit ausschließlich auf die Berechnung von dreipoligen Kurzschlüssen konzentriert, werden die anderen Arten nur kurz beleuchtet. [Calvas et al., 1992]

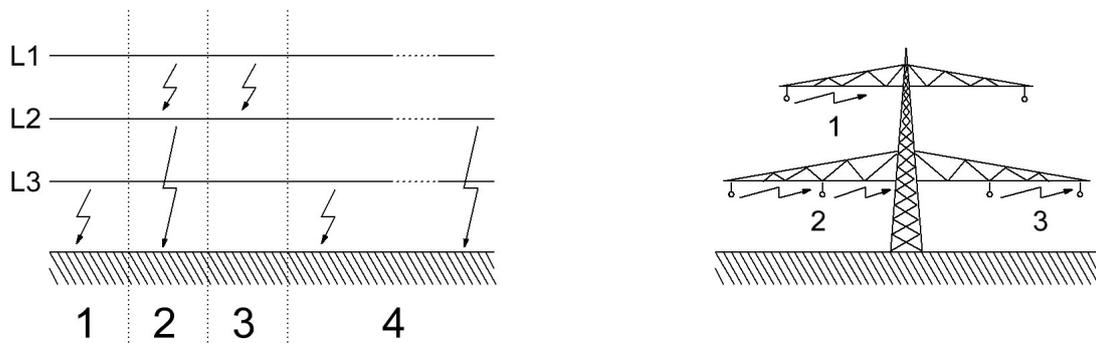


Abbildung 2.2: Kurzschlussarten im Dreileitersystem<sup>2</sup>

- 1: Erdschluss
- 2: Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung
- 3: Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung
- 4: Doppelerdschluss

<sup>2</sup>Bildquelle: [Heuck et al., 2010] (Seite 570)

### 2.3.1 Erdschluss

Bei einem Erdschluss besteht eine niederohmige Verbindung zwischen Außenleiter und der Erde. Diese Fehlerart wird je nach Spannungsebene und Schutz einpolig getrennt. Dies soll verhindern, dass Berührungsspannungen länger fortbestehen und eine Gefahr darstellen. Der Erdschluss ist einer der häufigsten Fehler im Hochspannungsnetz. Der Ort seines Auftretens kann über komplexere Analysemethoden bestimmt werden. Differenziert wird diese Kurzschlussart weiter durch das Erden des Sternpunkts. Wenn dies der Fall ist, handelt es sich nicht mehr um einen Erdschluss, sondern um einen Erdkurzschluss. [Schwab, 2006]

### 2.3.2 Zweipoliger Kurzschluss

Im Fall des zweipoligen Kurzschluss sind zwei der Außenleiter niederohmig verbunden. Bei zweipoligem Kurzschluss ohne Erdberührung ist der Sternpunkt irrelevant, weil der Fehlerstrom nur in den beiden Außenleitern fließt. Der zweipolige Kurzschlussstrom ist generell geringer als der dreipolige, außer der Kurzschluss tritt in unmittelbarer Nähe zu Asynchronmotoren auf. Bei zusätzlicher Erdberührung entwickelt sich an der Kurzschlussstelle häufig ein Lichtbogen, der zu einem dreipoligen Kurzschluss führt. [energie.de, 2014]

### 2.3.3 Dreipoliger Kurzschluss

Der dreipolige Kurzschluss besteht, wenn alle drei Außenleiter niederohmig verbunden sind. Dabei unterscheidet man Fälle mit oder ohne Erdberührung. Der dreipolige Kurzschluss stellt, bis auf wenige Ausnahmen, die größte thermische und mechanische Belastung für das Netz und die Betriebsmittel dar. Daher ist er für die Berechnung von neuen Anlagen essenziell. Die Regularien sind in der DIN VDE 0102 und [124] genauer beschrieben. Für die speziellen Anwendungen im Schifffahrt und im Offshorebereich gibt es die IEC 61363-1, an der sich diese Arbeit orientiert. [Heuck et al., 2010]

## 2.4 Zusammensetzung des Gesamtkurzschlussstroms

Der Kurzschluss gliedert sich in drei Phasen, die im nachfolgenden näher beschrieben werden. Diese Betrachtung erfolgt unter der Bedingung das die elektromagnetische Kraft über die Betrachtung als konstant angenommen wird, jedoch die innere Reaktanz des Generators als variabel. Die Reaktanzen ändern sich je nach Phase des Kurzschlusses.

Wie auf der Abbildung 2.3 dargestellt ist, werden die drei Phasen durch die jeweiligen Reaktanzen bestimmt. Die Reaktanzen nehmen in der angegebenen Reihenfolge zu: die subtransiente Reaktanz ist kleiner als die transiente Reaktanz und diese wiederum ist kleiner als die stationäre Reaktanz. Durch das Zunehmen der Reaktanzen folgt ein Abnehmen des Kurzschlussstroms.

In dem gesonderten Fall, in dem die Reaktanz des Generators schneller abnimmt als die Gleichstromkomponente, können Abschalt- und Sättigungsprobleme der magnetischen Kreise hervorgerufen werden, da der Nulldurchgang des Stroms erst nach mehreren Perioden erfolgt. [Calvas et al., 1992]

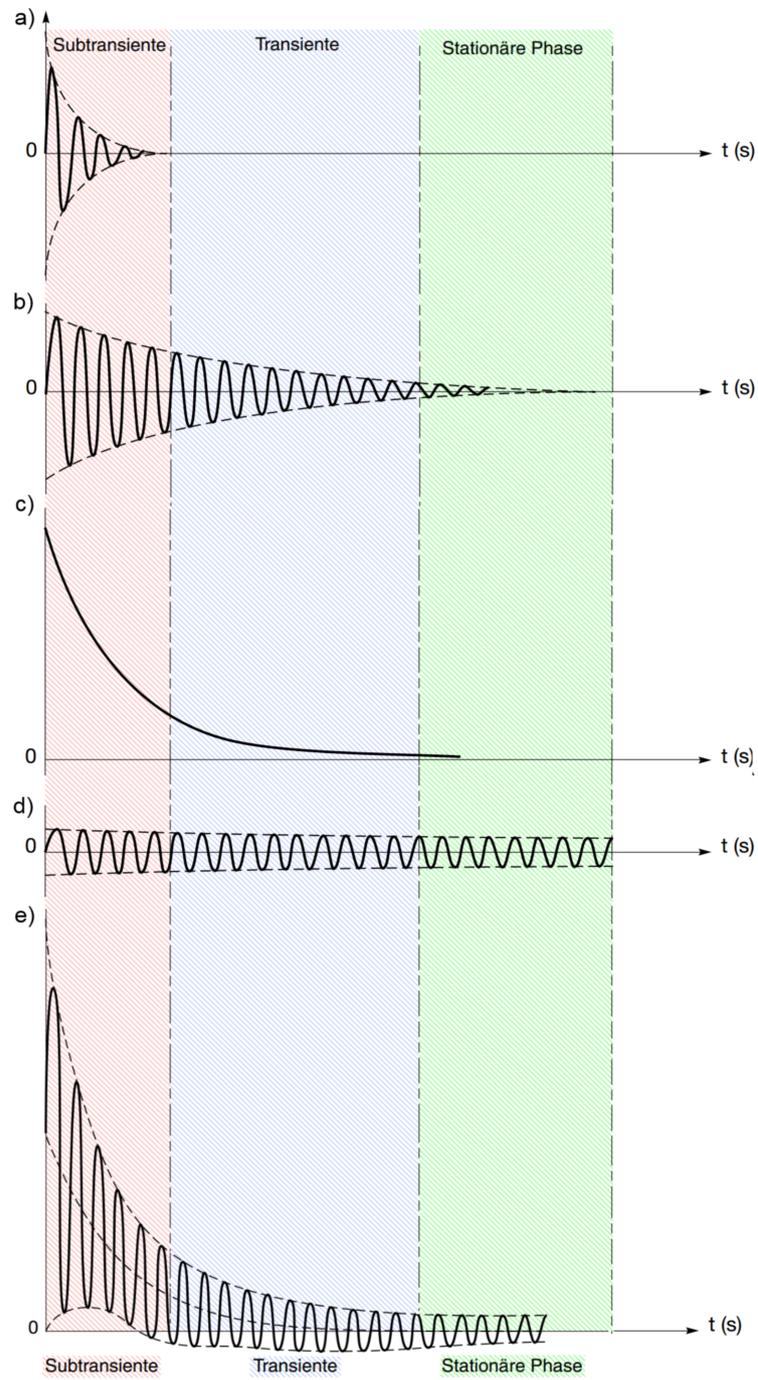


Abbildung 2.3: Phasen und Zusammensetzung des Kurzschlussstroms<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Bildquelle: [Calvas et al., 1992] (Seite 8)

- a) Beitrag der subtransienten Reaktanz
- b) Beitrag der transienten Reaktanz
- c) Beitrag der stationären Reaktanz
- d) Beitrag der Gleichstromkomponente
- e) Gesamtverlauf des Kurzschlussstroms

### 2.4.1 Subtransiente Phase

Die subtransiente Phase beschreibt die Zeit, die direkt nach dem Auftreten des Kurzschluss eintritt. Diese ist generell 10 bis 20 Millisekunden (bis maximal 100 Millisekunden) lang. Diese Phase wird durch die subtransiente Reaktanz  $X_d''$  beschrieben. Sie bewirkt einen sehr hohen Kurzschlussstrom der Wechselstromkomponente. Da die Zeitkonstante sehr klein ist, fällt dieser sehr schnell ab. Die subtransiente Reaktanz kann über bestimmte Messtechniken ermittelt werden. Diese Angabe kann generell dem Datenblatt entnommen werden. [Calvas et al., 1992]

### 2.4.2 Transiente Phase

In der transienten Phase besteht der Kurzschluss weiterhin, die Ausgleichsvorgänge klingen langsam ab. Diese Phase besteht zwischen etwa 100 Millisekunden bis einige Sekunden. Diese Phase ist durch die transiente Reaktanz  $X_d'$  beschrieben. [Calvas et al., 1992]

### 2.4.3 Stationäre Phase

Die stationäre Phase beschreibt die Zeit, in der der Kurzschlussstrom als praktisch konstant angenommen werden kann. Diese Phase wird durch die Reaktanz  $X_d$  beschrieben. Es wird auch vom Dauerkurzschlussstrom gesprochen. Die Entfernung des Kurzschlussorts zum Generator ist ausschlaggebend für die Ausprägung der Phasen. [Calvas et al., 1992]

## 2.5 Kurzschlüsse schalten

### 2.5.1 Leistungsschalter

Die Kurzschluss-Berechnung ist eine wichtige Grundlage für die Auslegung von Leistungsschaltern. Generell wird das Schalten von Leistungsschaltern übernommen, die für den Nennbetrieb und den maximal auftretenden Kurzschlussstrom ausgelegt werden. Bei der Wahl der Leistungsschalter müssen unterschiedliche Kriterien beachtet werden. Die Leistungsschalter unterteilen sich in zwei Kategorien:

P-1 : Diese Kurzschlussleistungskategorie hat eine „eingeschränkte Verfügbarkeit“ . Dies bedeutet, dass sich die Überlast-Schutzfunktion schon nach einer Kurzschluss-schaltung verschlechtern kann. Diese Klasse braucht ihren Nennstrom nach einer Kurzschlussstromschaltung nicht mehr führen zu können. Diese Leistungsschalterklasse ist nach Schalten eines Kurzschlusses wieder verwendbar, es wird aber empfohlen ihn zu wechseln. Diese Schalter werden dort eingesetzt, wo längere Ausfallzeiten, die für den Austausch benötigt werden, keine Rolle spielen.

P-2 : Diese Schaltkategorie wird fast ausschließlich verwendet. Im Gegensatz zu P-1 haben diese Leistungsschalter eine „uneingeschränkt Verfügbarkeit“. Diese Schalter sind auch nach einer schweren Kurzschluss-schaltung uneingeschränkt in ihrer Schutzfunktion. Die Leistungsschalter werden vor allem dort eingesetzt, wo gewährleistet werden muss, dass schnell wieder eingeschaltet werden kann.

Ein weiteres zu beachtendes Auswahlkriterium, das beachtet werden muss, ist, ob Kurzschlüsse direkt im Schalter entstehen bzw. ob diese in fernen Betriebsmitteln entstehen. Wenn sich ein Kurzschluss im ausgeschalteten Netz befindet und der Leistungsschalter zuschaltet, entsteht eine sehr hohe mechanische und thermische Belastung im Schalter. Tritt der Kurzschluss dagegen im Betriebsfall auf, kann der Leistungsschalter höhere Ströme schalten. Dieses unterschiedlichen Schaltvermögen liegt im Bereich von bis zu 15% des Kurzschlussstroms. [Gerin, 2006]

### 2.5.2 Einfluss der Abschaltgeschwindigkeit

Der Kurzschlussstrom wurde in der vorherigen Erörterung in seiner gesamten Dauer über alle drei Phasen des Kurzschlusses betrachtet. In der Praxis wird das Erreichen des stationären Bereiches nach Möglichkeit vermieden, um das Netz und die Betriebsmittel nicht zu beschädigen. Dieses wird durch Schutz- und Sicherheitsorgane verwirklicht. In Niederspannungsanlagen liegt der Schaltverzögerung im Bereich von 0,01 bis 0,03 Sekunden. Spezielle Schalteinrichtungen zur Kurzschlussstrombegrenzung schalten bereits bei Stromanstieg aus, noch vor Erreichen der großen Stromspitzen. [Roepfer, 1984]

# 3 Berechnungstheorie

## 3.1 Symmetrischer Kurzschluss

Ein symmetrischer Kurzschluss zeichnet sich durch Kurzschließen aller drei Außenleiter aus. Dieses kann beispielsweise durch eine feste Verbindung oder auch durch einen Lichtbogen entstehen.

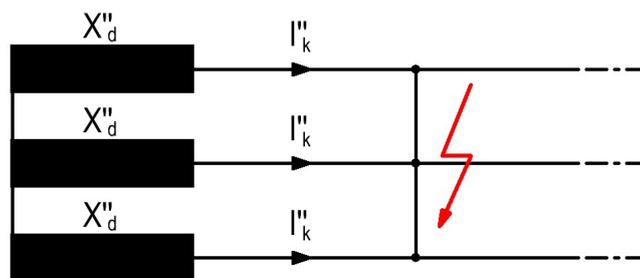


Abbildung 3.1: Kurzschlussarten Freileitung<sup>4</sup>

Dabei wird unterschieden, ob auf den Kurzschluss ein einzelner Generator, mehrere Generatoren oder ein ganzes Netz aus unterschiedlichen Komponenten speist. Für die Berechnung des Kurzschlussstroms muss ein Netzschaltplan mit Betriebsmitteln vorhanden sein. Unter Berücksichtigung der Betriebsmitteldaten werden die entsprechenden Impedanzen bestimmt. Das Zusammenfassen der Impedanzen abhängig von der Verschaltung führt zu einem stark vereinfachten Ersatzschaltbild. Aus diesem kann der Kurzschlussstrom berechnet und alle weiteren relevanten Größen abgeleitet werden.[Schwab, 2006]

### 3.1.1 einfache Einspeisung

Im einfachsten Fall speist ein Generator alleine über eine Leitung auf einen Kurzschluss. Die Berechnung ergibt sich dann lediglich aus den Generator- und der Leitungsimpedanz. Durch Zusammenfassen entsteht ein vereinfachtes Ersatzschaltbild, aus dem der Kurzschlussstrom ermittelt werden kann.

<sup>4</sup>Bildquelle: [Schwab, 2006] (Seite 749)

### 3.1.2 mehrfache Einspeisung

In der Praxis besteht ein Netz aus vielen Generatoren, Motoren und anderen aktiven und passiven Betriebsmitteln, die sich auf Kurzschlussströme auswirken können. Das Aufstellen eines Ersatzschaltbildes wird entsprechend komplexer. Über das Verfahren der Ersatzspannungsquellen oder das in der IEC Norm beschriebenes Verfahren lassen sich die Teilkurzschlussströme ermitteln und zu einem Gesamtkurzschlussstrom zusammenfassen. Das Berechnen aus der IEC Norm wird im folgenden genauer beschrieben.[Schwab, 2006]

## 3.2 Kurzschlussberechnung nach IEC 61363-1

In der Norm IEC 61363-1 wird auf alle gängiges Betriebs- und Bauteile eingegangen. Diese unterscheiden sich in einigen Punkten von der DIN VDE Norm. In diesem Abschnitt sind die in der späteren Programmierung benutzen Formeln sowie die Grundprinzipien der Berechnung erläutert.

### 3.2.1 Synchrongenerator

Die Energieversorgung von Schiffssystemen wird generell durch große Synchrongeneratoren verwirklicht, die durch Verbrennungsmotoren angetrieben werden. Das Berechnen der Generatoren erfolgt über die Angaben aus dem Datenblatt bzw. anhand von Herstellerangaben.[IEC61363-1, 1998]

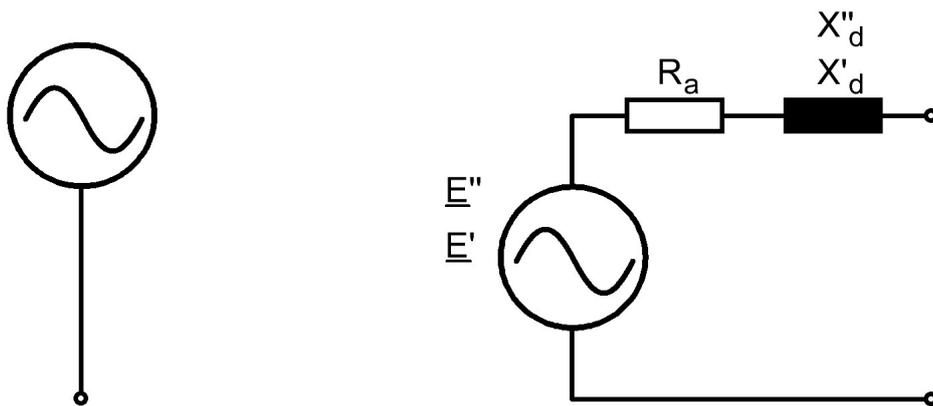


Abbildung 3.2: Synchrongenerator im System und Ersatzschaltbild<sup>5</sup>

<sup>5</sup>Bildquelle: [IEC61363-1, 1998] (Seite 31)

Die Berechnung des Synchrongenerators baut sich wie folgt auf:

Im ersten Schritt werden die bezogenen Größen aus dem Datenblatt auf die absoluten Größen umgerechnet.

Der Statorwiderstand:

$$R_{aG} = \frac{U_{nG}^2 \cdot r_{aG}}{S_{nG}} \quad (3.1)$$

Die subtransiente Reaktanz:

$$X_d'' = \frac{x_d'' \cdot U_{nG}^2}{S_{nG}} \quad (3.2)$$

Die transiente Reaktanz:

$$X_d' = \frac{x_d' \cdot U_{nG}^2}{S_{nG}} \quad (3.3)$$

Die statische Reaktanz:

$$X_d = \frac{x_d \cdot U_{nG}^2}{S_{nG}} \quad (3.4)$$

Aus den einzelnen Größen ergibt sich die gesamte Impedanz der Synchronmaschine:

Die subtransiente Impedanz:

$$Z_d'' = \sqrt{R_a^2 + X_d''^2} \quad (3.5)$$

Die transiente Impedanz:

$$Z_d' = \sqrt{R_a^2 + X_d'^2} \quad (3.6)$$

Die stationäre Impedanz:

$$Z_d = \sqrt{R_a^2 + X_d^2} \quad (3.7)$$

Die subtransiente Anfangsspannung, die nach Eintritt des Kurzschlusses wirksam ist, wird generell als Sternspannung angegeben und ist unter anderem abhängig von der Vorbelastung.

$$E_q'' = \sqrt{\left(\frac{U_{nG}}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\varphi) + R_a \cdot I_{nG}\right)^2 + \left(\frac{U_{nG}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\varphi) + X_d'' \cdot I_{nG}\right)^2} \quad (3.8)$$

äquivalent dazu die transiente Spannung:

$$E_q' = \sqrt{\left(\frac{U_{nG}}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\varphi) + R_{aG} \cdot I_{nG}\right)^2 + \left(\frac{U_{nG}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\varphi) + X_d' \cdot I_{nG}\right)^2} \quad (3.9)$$

Über die bereits ermittelten Größen können nun die resultierenden Kurzschlussströme berechnet werden.

Für den subtransienten Kurzschlussstrom ergibt sich:

$$I_k'' = \frac{E_q''}{Z_d''} \quad (3.10)$$

Der transiente Kurzschlussstrom:

$$I_k' = \frac{E_q'}{Z_d'} \quad (3.11)$$

Der gesamt Kurzschlussstrom wird durch die Formel 3.12 beschrieben. Dabei stellt der erste Term die subtransiente Komponente dar, der zweite die transiente und der letzte den stationären Kurzschlussstrom.

Für die zeitlich abhängige Wechselstrom-Komponente:

$$i_{acG}(t) = (I_k'' - I_k') \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} + (I_k' - I_k) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + I_k \quad (3.12)$$

Für die Gleichstrom-Komponente:

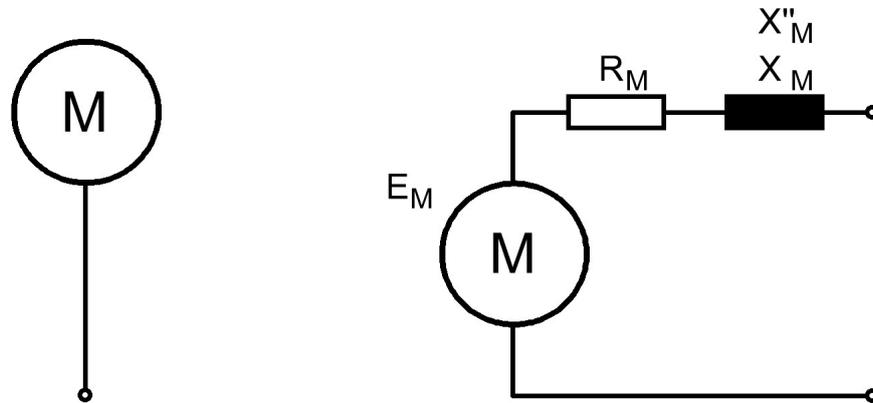
$$i_{dcG}(t) = \sqrt{2} \cdot (I_k'' - I_{nG} \cdot \sin(\varphi)) \cdot e^{-\frac{t}{T_{DCM}}} \quad (3.13)$$

Der Stoßkurzschlussstrom setzt sich aus dem Wechsel- und Gleichstrom zusammen:

$$i_p = \sqrt{2} \cdot I_{ac}(t) + i_{dc}(t) \quad (3.14)$$

### 3.2.2 Asynchronmotoren

Asynchronmotoren werden in zwei Leistungskategorien unterteilt. Dabei können viele kleinere Motoren, wie beispielsweise Kraftstoffpumpen, bei denen nicht viel Leistung bezogen wird, zusammengefasst werden. Für große Motoren wie Bugstrahlruder, Kräne oder Ladungspumpen muss eine individuelle Betrachtung erfolgen, da die in den Massen gespeicherte Energie im Fall des Kurzschluss einen essentiellen Teil des Kurzschlussstroms verursacht. [IEC61363-1, 1998]



**Abbildung 3.3:** Asynchronmotor im System und Ersatzschaltbild<sup>6</sup>

Für die Berechnung kommen folgende Formeln zum tragen:

Im ersten Schritt wird der Nennstrom für den Motor berechnet. Dieser ergibt sich aus der Nennleistung, dem Wirkungsgrad  $\cos(\varphi)$  und der Nennspannung.

Der Nennstrom des Motors:

$$I_{nM} = \frac{P_{nM}}{\sqrt{3} \cdot U_{nM} \cdot \cos(\varphi) \cdot \eta} \quad (3.15)$$

Weiter werden die Motorimpedanz berechnet sowie die Widerstände von Rotor und Stator auf absolute Werte umgerechnet.

Impedanz des Motors:

$$Z_{Mmot} = \frac{U_{nM}}{\sqrt{3} \cdot I_{nM}} \quad (3.16)$$

Widerstand des Stators:

$$R_S = Z_{Mmot} \cdot r_{Stator} \quad (3.17)$$

Widerstand des Rotors:

$$R_R = Z_{Mmot} \cdot r_{Rotor} \quad (3.18)$$

Gesamtwiderstand des Motors

$$R_M = R_S + R_R \quad (3.19)$$

Die subtransiente Reaktanz wird wie folgt berechnet. Da Motoren nur verhältnismäßig kurz auf den Anfangskurzschlussstrom speisen, wird die transiente Reaktanz vernachlässigt.

<sup>6</sup>Bildquelle: [IEC61363-1, 1998] (Seite 37)

Die subtransiente Reaktanz:

$$X''_M = \frac{U_{nM} \cdot (x_{\delta_{Rotor}} + x_{\delta_{Stator}})}{\sqrt{3} \cdot I_{nM}} \quad (3.20)$$

Die Zeitkonstanten ermitteln sich aus dem Verhältnis von subtransienter Reaktanz zu Rotorwiderstand und Statorwiderstand.

Subtransient Zeitkonstante:

$$T''_M = \frac{X''_M}{2 \cdot \omega \cdot R_R} \quad (3.21)$$

Gleichspannungszeitkonstante:

$$T_{DCM} = \frac{X''_M}{2 \cdot \omega \cdot R_S} \quad (3.22)$$

Die subtransiente Anfangsspannung des Motors wird durch folgende Formel berechnet:

$$E''_M = \sqrt{\left(\frac{U_{nG}}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\varphi) - R_M \cdot I_{nM}\right)^2 + \left(\frac{U_{nG}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\varphi) - X''_M \cdot I_{nM}\right)^2} \quad (3.23)$$

Anfangsstrom, Wechselstrom, Gleichstrom und Stoßkurzschlussstrom werden über ihre Abhängigkeiten von Anfangsspannung und Motorimpedanz ermittelt.

$$I''_M = \frac{E''_M}{Z''_K} \quad (3.24)$$

Die zeitlich abhängige Wechselstrom-Komponente:

$$i_{acM}(t) = I''_M \cdot e^{-\frac{t}{T''_M}} \quad (3.25)$$

Die zeitlich abhängige Gleichstrom-Komponente:

$$i_{dcM}(t) = \sqrt{2} \cdot (I''_M + I_{nM} \cdot \sin(\varphi)) \cdot e^{-\frac{t}{T_{dcM}}} \quad (3.26)$$

Stoßkurzschlussstrom:

$$i_p(t) = \sqrt{2} \cdot I_{ac}(t) + i_{dc}(t) \quad (3.27)$$

### 3.2.3 Transformator

Transformatoren, die für das Wandeln der Spannung zwischen den unterschiedlichen Spannungsebenen fungieren, sind ein wichtiges Bauteil für die Kurzschluss-Berechnung.

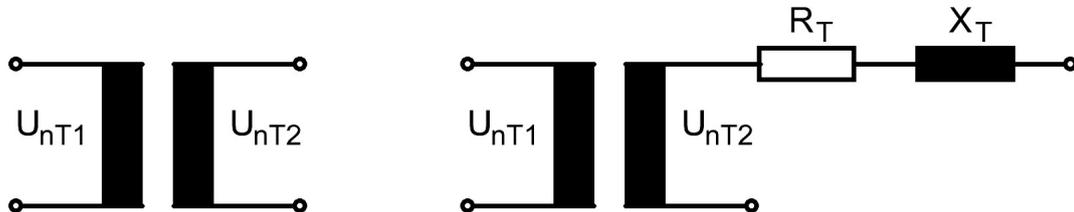


Abbildung 3.4: Transformator im System und Ersatzschaltbild<sup>7</sup>

Ausschlaggebend für die Transformatoren ist die Angabe der Hoch- und Niederspannungsseite mit Angabe der ohmschen  $u_r$  % und induktiven  $u_k$  % Verluste. Im ersten Schritt wird das Übersetzungsverhältnis zwischen Ober- und Unterspannungsseite definiert.[IEC61363-1, 1998]

Das Übersetzungsverhältnis:

$$\ddot{u} = \frac{U_{nT1}}{U_{nT2}} \quad (3.28)$$

Der Transformator-Widerstand

$$R_T = \frac{u_R}{100\%} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} = \frac{P_{K_{nT}}}{3 \cdot I_{nT}^2} \quad (3.29)$$

Die Kurzschlussimpedanz des Transformators:

$$Z_T = \frac{u_k}{100\%} \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \quad (3.30)$$

Die Transformator-Reaktanz

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (3.31)$$

### 3.2.4 Umrichter

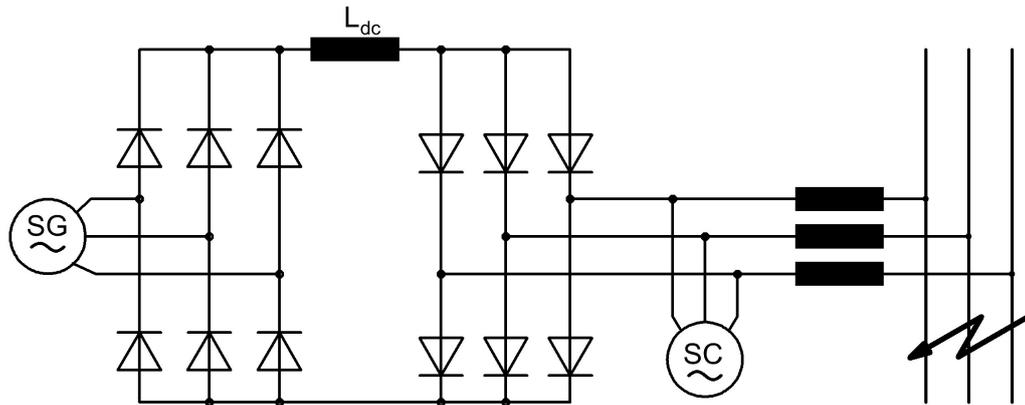
Grundlegend muss bei Umrichtern unterschieden werden, ob diese überhaupt rückspeisen können. In der Norm wird hierfür auf Hersteller und Datenblätter verwiesen, da jeder Umrichter unterschiedliches Kurzschlussverhalten aufweist.

Die großen Umrichter im Schiffbau sind die der Fahranlagen und der Wellengeneratoren. Der Wellengenerator ist eine Synchronmaschine, die an der Antriebswelle des Schiffs mitläuft. Dieser versorgt das Schiff auf See. Dieses erfolgt fast

<sup>7</sup>Bildquelle: [IEC61363-1, 1998] (Seite 47)

Drehzahl-unabhängig über einen Umrichter und ersetzt so zusätzliche Dieselgeneratoren. [IEC61363-1, 1998]

Ein Möglichkeit für eine Wellengeneratoranlage:



**Abbildung 3.5:** Wellengenerator mit Umrichter und Blindleistungsmaschine<sup>8</sup>

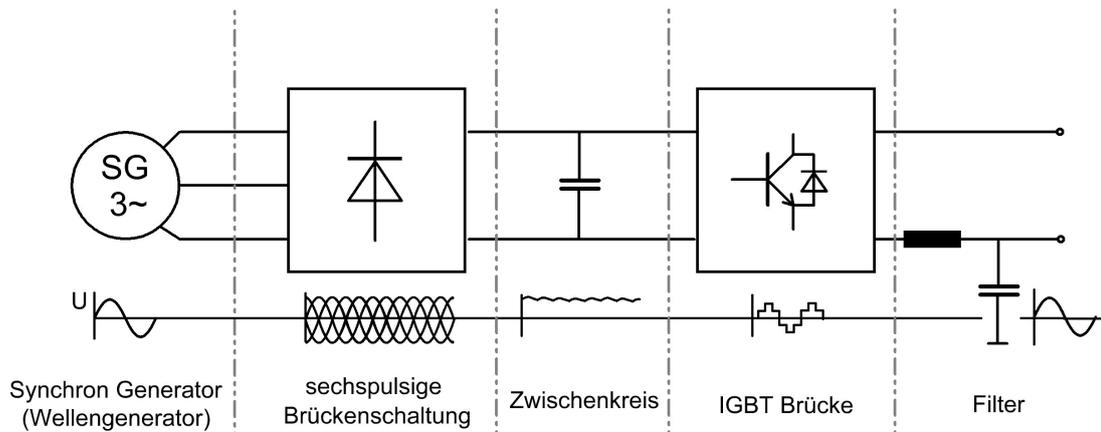
Wie aus Abbildung 3.5 hervorgeht, arbeitet ein kleiner Synchrongenerator, ein sogenannter Pony-Motor, für die Bereitstellung von Blindleistung. Im Fall eines Kurzschlusses speist der Umrichter ins Netz zurück. [IEC61363-1, 1998]

Weiter werden folgende Anforderungen vorausgesetzt:

- alle Komponenten funktionieren über die Dauer des Kurzschluss weitergehend normal
- Das System trägt nur zum Stoßkurzschlussstrom bei
- Für die Dauer des betrachteten Kurzschlusses dürfen keine Schutzvorrichtungen aktiv sein
- Es können nur dreiphasige Kurzschlüsse behandelt werden
- Der Umrichter fährt für mindestens 10 Millisekunden mit der Kommutierung fort

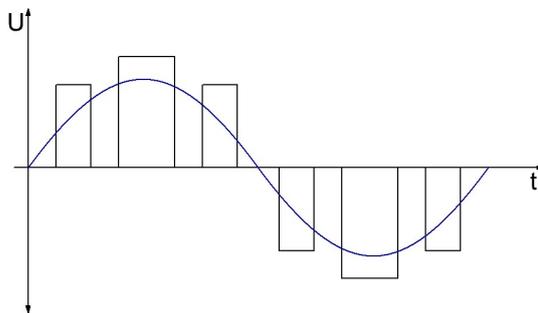
Dieser Aufbau ist heute nicht mehr zeitgemäß. Die heutige Umrichtertechnik lässt neue, effektivere und wirtschaftlichere, Betriebsmöglichkeiten zu. Moderne Anlagen arbeiten wie folgt:

<sup>8</sup>Bildquelle: [IEC61363-1, 1998] (Seite 43)

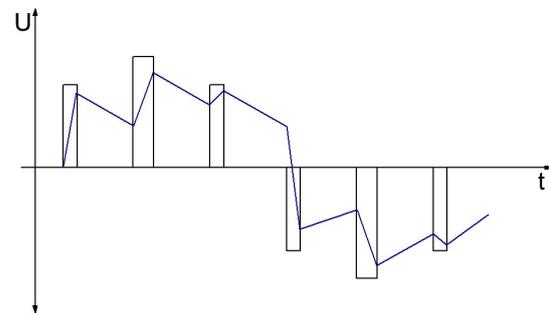


**Abbildung 3.6:** Wellengenerator mit IGBT-Brücke

Tritt bei diesem Aufbau ein Kurzschluss auf wirkt dieser als Entlastung auf die Synchrongenerator. Da keine Leistung mehr ins Netz gespeist wird. Im Kurzschlussfall steigt der ins Netz gespeiste Strom, während die Spannung praktisch Null ist. Die Spannung im Zwischenkreis steigt in folge der Entlastung. Die IGBT-Brücke speist den Strom impulsartig ins Netz. Der Normalbetrieb und der Kurzschlussfall werden in [Abbildung 3.7](#) und [3.8](#) vereinfacht dargestellt.

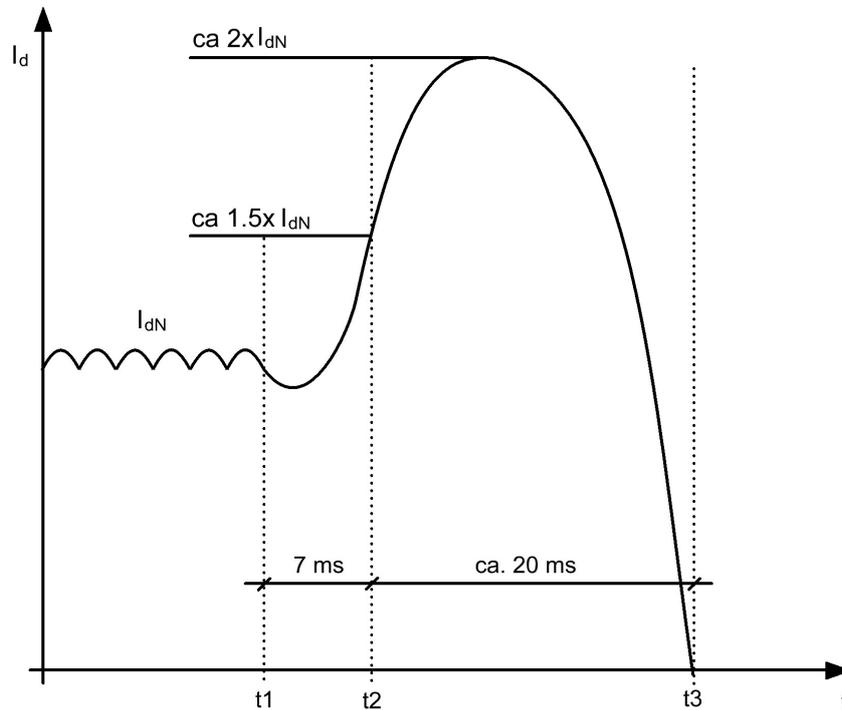


**Abbildung 3.7:** Spannungsverlauf des Umrichters im Normalbetrieb



**Abbildung 3.8:** Spannungsverlauf des Umrichters bei Kurzschluss

Wie eingangs erwähnt, können die Umrichter ein sehr individuelles Kurzschlussverhalten haben. Einige Umrichter werden durch ein Verhalten wie auf [Abbildung 3.9](#) beschrieben. Der Umrichter speist mit einem hohen Strom noch für einen kurzen Moment nach dem Kurzschluss in Netz. Für diesen Umrichtertyp wäre eine genauere Betrachtung des Zeitverhaltens in Bezug auf den Kurzschlussstrom nötig. [[Hafner, 2004](#)]



**Abbildung 3.9:** Zeitliches Kurzschlussverhalten des Umrichter<sup>9</sup>

Für die Berechnungssoftware wurde unter Berücksichtigung der mathematischen Kurzschluss-Berechnung, folgende Annahmen getroffen:

- Die subtransiente Phase wird mit einer Dauer von 10 Millisekunden und einem Faktor von  $1.1 \cdot I_k/I_n$  beschrieben
- Die transiente Phase wird mit einer Dauer von 1000 Millisekunden und einem Faktor von  $1.05 \cdot I_k/I_n$  beschrieben
- Der Dauerkurzschlussstrom für die stationäre Phase wird über das Verhältnis von Nennstrom zu Kurzschlussstrom angegeben.
- Der Umrichter liefert im Kurzschlussfall nur einen Spannungswechsel-Anteil

### 3.2.5 Leitungen und Spulen

Auch Leitungen (als Verbindung von Bauteilen und Schalttafeln) und Spulen sind bei der Kurzschlussstrom-Berechnung zu beachten. Leitungswiderstände wirken sich auf die Berechnung von Schiffssystemen nur gering aus, da Leitungen große Querschnitte und nur kurze Länge aufweisen. Große Spulen werden zur Begrenzung von Kurzschlussströmen eingesetzt.

<sup>9</sup>Bildquelle: [Hafner, 2004] (Seite 29)



**Abbildung 3.10:** Vereinfachtest Ersatzschaltbild einer Leitung<sup>10</sup>

Der Leiter-Widerstand setzt sich aus Ohmschem- und Induktivenanteil zusammen. Bei der Berechnung kommen unterschiedliche Faktoren zum Tragen, wie die Verlegeart, Material, Bündelung usw. Um die Berechnung zu verkürzen, wurden die vom Leitungshersteller zu erwarteten Widerstandswerte in einer Tabelle zusammengetragen. Dabei ist zu unterscheiden, ob es sich um ein 50 Hz oder 60 Hz Netz handelt. Etwa 80 % der Heutigen Schiffe fahren mit einer Netzfrequenz von 60 Hz. [Hafner, 2004]

**Tabelle 3.1:** Kurzschlussströme Leitung

Q[mm <sup>2</sup> ]	X <sub>L</sub> [mΩ/km]		R <sub>L</sub> [mΩ/km]
	50 Hz	60 Hz	
1,5	0,132	0,158	13100
2,5	0,117	0,140	7860
4	0,106	0,127	4910
6	0,098	0,118	3280
10	0,091	0,109	1965
16	0,085	0,103	1230
25	0,081	0,098	786
35	0,079	0,095	560
50	0,077	0,092	393
70	0,075	0,090	280
95	0,073	0,088	206
120	0,072	0,087	164
150	0,072	0,086	131
185	0,071	0,085	106
240	0,070	0,084	81,8
300	0,070	0,084	65,5

<sup>10</sup>Bildquelle: [IEC61363-1, 1998] (Seite 47)

### 3.2.6 Erzeugen von Ersatzmotoren

Um die gesamte Berechnung übersichtlich und einfacher zu gestalten, können mehrere Motoren zu einem Ersatzmotor zusammengefasst werden.

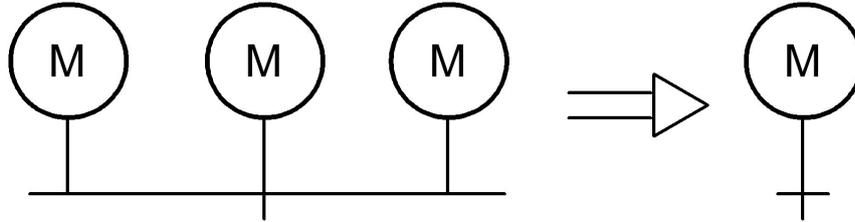


Abbildung 3.11: Zusammenfassen von mehreren Motoren<sup>11</sup>

Im ersten Schritt werden alle individuellen Kurzschlussströme der einzelnen Motoren summiert zu  $I_{acM}(t)_{To}$  und  $I_{dcM}(t)_{To}$  über Gleichung (3.33) und (3.34).

$$I_{acM}(t)_{To} = \sum I_{acM}(t) \quad (3.32)$$

$$I_{dcM}(t)_{To} = \sum I_{dcM}(t) \quad (3.33)$$

Die Kurzschlussströme für den Ersatzmotor können auch über die Gleichungen 3.34 und 3.35 ermittelt werden

$$I_{acM*}(t) = I''_{M*} \cdot e^{-t/T_{M*}} \quad (3.34)$$

$$I_{dcM*}(t) = \sqrt{2} \cdot I''_{M*} \cdot e^{-t/T_{M*}} \quad (3.35)$$

mit  $I''_{M*}$  all Summe aller transienten Kurzschlussströme

$$I''_{M*} = \sum I''_M \quad (3.36)$$

Im nächsten Schritt wird die neue Ersatzimpedanz über Formel 3.37 berechnet.

$$Z''_{M*} = U_0 / (\sqrt{3} \cdot I''_{M*}) \quad (3.37)$$

Durch das Zusammenfassen von mehrere Motoren müssen die Zeitkonstanten neu angepasst werden:

$$T''_{M*} = -t_x / \ln[K''_M(t_x) / I''_{M*}] \quad (3.38)$$

$$T_{dcM*} = -t_x / \ln[K_{dcM}(t_x) / \sqrt{2} \cdot I''_{M*}] \quad (3.39)$$

Für dieses Berechnung müssen zunächst die Hilfsgrößen  $K''_M(t_x)$  und  $K_{dcM}(t_x)$  eingeführt werden. Diese repräsentieren die Motorströme unter Berücksichtigung der ein-

<sup>11</sup>Bildquelle: [PowerFactory, 2009] (Seite 20)

zelenen Zeitkonstanten.

$$K_M''(t_x) = \sum I_M'' \cdot e^{-t_x/T_M''} \quad (3.40)$$

$$K_{dcM}(t_x) = \sqrt{2} \sum I_M'' \cdot e^{-t_x/T_{dcM}} \quad (3.41)$$

Durch mathematisches Umstellen ergeben sich aus diesen Gleichungen die Gleichungen 3.38 und 3.39, wobei  $t_x$  den Zeitpunkt beschreibt, zu dem der Kurzschlussstrom ermittelt wird.

Weiter werden die Stator- und Rotorwiderstände ermittelt:

$$R_{R_*} = c_1 \cdot X_{M_*}'' \quad (3.42)$$

$$R_{S_*} = c_2 \cdot X_{M_*}'' \quad (3.43)$$

mit

$$c_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{M_*}''} \quad (3.44)$$

$$c_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{dcM_*}} \quad (3.45)$$

$$Z_{M_*}'' = \sqrt{(R_{S_*} + R_{R_*})^2 + (X_{M_*}'')^2} \quad (3.46)$$

und

$$X_{M_*}'' = \frac{Z_{M_*}''}{\sqrt{1 + (c_1 + c_2)^2}} \quad (3.47)$$

Der neu entstandene Ersatzmotor repräsentiert alle einbezogenen Motoren mit angepassten Zeitkonstanten, Impedanz und Stromwerten. [IEC61363-1, 1998]

### 3.3 Erzeugen von Ersatzgeneratoren

Auch Motoren und Generatoren lassen sich zusammenfassen. [IEC61363-1, 1998]

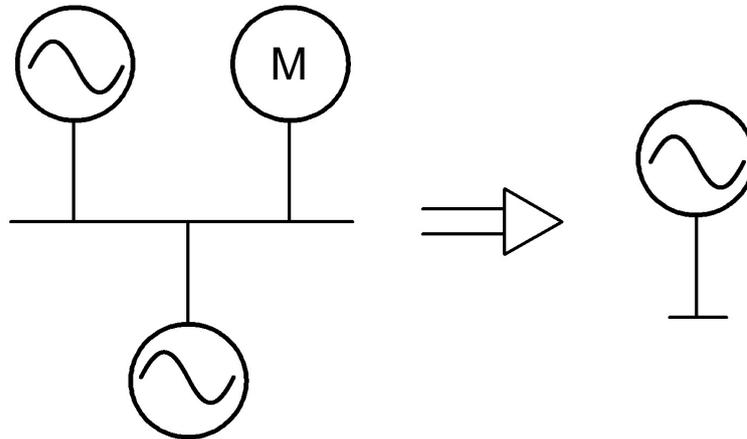


Abbildung 3.12: Zusammenfassen von Motoren und Generatoren<sup>12</sup>

Dieses Verfahren ist mathematisch sehr aufwändig, weshalb es in mehrere Abschnitte unterteilt ist.

#### 3.3.1 Bestimmen von $I_{ac}(t)_*$

Im ersten Schritt werden für die Bestimmung der Wechselstromkomponente des Ersatzgenerators alle zeitlich abhängigen Ströme, der Motoren und Generatoren summiert:

$$I_{ac}(t)_{To} = \sum I_{acG}(t) + \sum I_{acM}(t) \quad (3.48)$$

$$I_{dc}(t)_{To} = \sum I_{dcG}(t) + \sum I_{dcM}(t) \quad (3.49)$$

Die neue  $I_{ac}(t)_*$  Komponente des Ersatzgenerators besteht, wie bei der Beschreibung des Synchrongenerators, aus Gleichung 3.50. Die drei Terme repräsentieren die Kurzschlussströme im subtransienten, transienten und stationären Kurzschlussstrom. Die Zeitkonstanten beschreiben die Dauer jeder dieser Ströme.

$$I_{ac}(t)_* = (I''_* - I'_*) \cdot e^{-t/T''_{d*}} + (I'_* - I_{k*}) \cdot e^{-t/T'_d} + I_{k*} \quad (3.50)$$

Dieser Ausdruck kann auch verkürzt geschrieben werden:

$$I_{ac}(t)_* = M_* \cdot e^{-t/T''_{d*}} + N_* \cdot e^{-t/T'_d} + I_{k*} \quad (3.51)$$

<sup>12</sup>Bildquelle: [PowerFactory, 2009] (Seite 20)

Die drei Hauptterme werden über das Summieren der Kurzschlussströme der Motoren(M) und Generatoren(G) ermittelt:

$$I''_* = \sum_i^n I''_{Gi} + \sum_j^n I''_{Mj} \quad (3.52)$$

$$I'_* = \sum_i^n I'_{Gi} \quad (3.53)$$

$$I_{k*} = \sum_i^n I_{Gi} \quad (3.54)$$

Die Konstanten  $M_*$  und  $N_*$  aus Gleichung 3.51 werden über (3.56) und (3.57) ermittelt.

$$M_* = (I''_* - I'_*) \quad (3.55)$$

$$N_* = (I'_* - I_{k*}) \quad (3.56)$$

### 3.3.2 Bestimmen der Zeitkonstante $T''_{d*}$

Zur Ermittlung der neuen Zeitkonstanten des Ersatzgenerators ist es zunächst notwendig die Hilfsfunktion  $K''(t)$  zu definieren.

$$K''(t) = (I''_G - I'_G) \cdot e^{-t/T''_{d*}} + I'_G \quad (3.57)$$

Die Funktion muss für jeden Generator und Motor (oder über die Hilfsgröße  $K''(t)_*$  für alle beteiligten Motoren und Generatoren) berechnet werden:

$$K''(t)_* = M_* \cdot e^{-t/T''_{d*}} + I'_* \quad (3.58)$$

diese Gleichung ist äquivalent zu

$$K''(t)_* = \sum_i^n K''(t) + \sum_j^n I''_{Mj} \cdot e^{-t/T''_{d*}} \quad (3.59)$$

Durch mathematisches Umformen der Gleichung (3.59) nach  $T''_{d*}$  ergibt sich folgende Gleichung für die neue Zeitkonstante des Ersatzgenerators :

$$T''_{d*} = -t_x / \ln[(K''(t_x)_* - I'_*)/M_*] \quad (3.60)$$

### 3.3.3 Ermitteln der Zeitkonstante $T'_{d*}$

Wie bereits bei  $T''_{d*}$ , wird aus der Grundgleichung 3.51 das  $T'_{d*}$  ermittelt:

$$I_{ac}(t_x)_* = M_* \cdot e^{-t_x/T''_{d*}} + N_* \cdot e^{-t_x/T'_{d*}} + I_{k*} \quad (3.61)$$

Diese Gleichung ist äquivalent zu

$$I_{ac}(t_x)_* = \sum_i^n I_{acG}(t_x)_G + \sum_j^n I_{acM}(t_x)_M \quad (3.62)$$

wobei hier der Kurzschlussstrom zu einem bestimmten Zeitpunkt  $(t_x)_*$  ermittelt wird.

Durch mathematisches umstellen der Gleichungen (3.61) ergibt sich die Gleichung für  $T'_{d*}$ :

$$T'_{d*} = -t_x / \ln \left\{ \left[ I_{ac}(t_x)_* - (M_* \cdot e^{-t_x/T'_{d*}} + I_{k*}) \right] / N_* \right\} \quad (3.63)$$

### 3.3.4 Ermitteln der Gleichspannungskonstanten $T_{dc*}$

Die neuen Gleichspannungskonstante  $T_{dc*}$  wird über die Gleichung (3.64) ermittelt für den Zeitpunkt  $t = t_x$ :

$$i_{dc}(t_x)_* = \sqrt{2} \cdot I''_* \cdot e^{-t_x/T_{dc*}} \quad (3.64)$$

Diese Gleichung ist äquivalent zu

$$I_{dc}(t_x)_* = \sum_i^n i_{dc}(t_x)_{Gi} + \sum_j^n i_{dc}(t_x)_{Mj} \quad (3.65)$$

Wobei auch hier jeder Generator(G) und Motor(M) in die Berechnung einfließt.

Durch mathematisches Umstellen der Gleichung (3.64) wird die neue Zeitkonstante für den Ersatzgenerator ermittelt:

$$T_{dc*} = -t_x / \ln \left[ i_{dc}(t_x)_* / \sqrt{2} \cdot I''_* \right] \quad (3.66)$$

### 3.3.5 Bestimmen der Impedanz des Ersatzgenerators

Im abschließenden Schritt werden die Ersatzimpedanzen des Ersatzgenerators ermittelt. Der Ersatzwiderstand über Gleichung (3.67)

$$R_* = X''_*/2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{dc*} = c_3 \cdot X''_* \quad (3.67)$$

mit

$$c_3 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_{dc*}} \quad (3.68)$$

Die Ersatzimpedanz wird simpel aus dem Ohm'schen Gesetz, die subtransiente, transiente und stationären Impedanz über die jeweiligen Kurzschlussströme ermittelt:

$$Z_* = \sqrt{(R_*^2 + X_*^2)} \quad (3.69)$$

$$Z''_* = U_0 / (\sqrt{3} \cdot I''_*) \quad (3.70)$$

$$Z'_* = U_0 / (\sqrt{3} \cdot I'_*) \quad (3.71)$$

$$Z_* = U_0 / (\sqrt{3} \cdot I_*) \quad (3.72)$$

äquivalent dazu werden die Ersatzreaktanzen ermittelt:

$$X''_* = Z''_* / \sqrt{1 + c_3^2} \quad (3.73)$$

$$X'_* = \sqrt{Z'^2_* - R_*^2} \quad (3.74)$$

$$X_* = \sqrt{Z_*^2 - R_*^2} \quad (3.75)$$

### 3.4 Vereinfachungen durch Norm

In vielen Fällen werden Kurzschluss-Berechnungen in der Planungsphase von neuen Betriebsanlagen getätigt. Viele Betriebsmittel sind zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt, so dass keine Daten zu allen Bauteilen vorhanden sind. Für diesen Fall sind in der IEC Norm einige Annäherungen für Motoren gemacht worden, auf die zurück gegriffen werden kann. [IEC61363-1, 1998]

#### 3.4.1 Große Motoren

Als große Motoren zählen alle Motoren, die mehr als 100 kW oder mehr als 15 % der angeschlossenen Generatorleistung beziehen. Bei unbekanntem Motordaten kann auf folgende Werte zurück gegriffen werden. Die Einheiten sind im Per-Unit-System angegeben und beziehen sich auf die Bezugswerte, der jeweiligen Kategorie. [IEC61363-1, 1998]

Für die Motorimpedanz können folgende Werte angenommen werden:

- Motorimpedanz  $Z''_M$

Für 50 Hz und 60 Hz gilt:

$$z''_M = 0,16 \text{ p.u.}$$

$$x''_M = 0,15 \text{ p.u.}$$

$$r_s = 0,034 \text{ p.u.}$$

$$r_M = 0,021 \text{ p.u.}$$

$$r_M = r_s + r_R = 0,055 \text{ p.u.}$$

wobei  $Z''_M$  die feste Roterimpedanz ist.

- Für die Zeitkonstanten:
  - Bei 60 Hz,  $T''_M = 18,67 \text{ ms}$   $T_{dcM} = 11,73 \text{ ms}$

– Bei 50 Hz,  $T_M'' = 22,40 \text{ ms}$   $T_{dcM} = 14,08 \text{ ms}$

- Die Kurzschlussströme unter der Bedingung, dass die Vorladezeit ignoriert wird.

$$I_M'' = 6,25 I_{rM}$$

$$I_{acM} = 4,00 I_{rM} \quad \text{at } t = T/2$$

$$i_{pM} = 10 I_{rM}$$

- Eingprägter Rotorstrom

Wenn der Rotorstrom  $I_{LR}$  bekannt ist, gilt  $I_M'' = I_{LR}$ .

- Wenn keine Motordaten verfügbar sind, wird für die Anschlussleistung folgende Annäherung gemacht:
  - Für Asynchronmotoren  $1 \text{ kW} = 1.34 \text{ kVA}$
  - Für Synchronmotoren  $1 \text{ kW} = 1 \text{ kVA}$

Für den Leistungsfaktor wird mit 0.8 gerechnet.

### 3.4.2 Kleine Motoren

Mehrere kleine Motoren die über eine Sammelschiene verbunden sind, können zu einem Motor Zusammengefasst werden. [IEC61363-1, 1998]

Für die Gruppe von Motoren, inklusive Anschlussleitungen, kann dann von folgenden Werten ausgegangen werden:

- Motorimpedanz  $Z''_M$

Für 50 Hz und 60 Hz gilt:

$$z''_M = 0,2 \text{ p.u.}$$

$$x''_M = 0,188 \text{ p.u.}$$

$$r_s = 0,043 \text{ p.u.}$$

$$r_M = 0,027 \text{ p.u.}$$

$$r_M = r_s + r_R = 0,07 \text{ p.u.}$$

- Zeitkonstanten

- Bei 60 Hz,  $T''_M = 18,67 \text{ ms}$   $T_{dcM} = 11,73 \text{ ms}$

- Bei 50 Hz,  $T''_M = 22,40 \text{ ms}$   $T_{dcM} = 14,08 \text{ ms}$

- Kurzschlussströme unter der Bedingung das die Vorladezeit ignoriert wird.

$$I''_M = 5,0 I_{rM}$$

$$I_{acM} = 3,2 I_{rM} \quad \text{at } t = T/2$$

$$i_{pM} = 8,0 I_{rM}$$

- Die Anschlussleistungskalkulation erfolgt ebenso wie bei den Großen Motoren, wie unter 3.4.1 beschrieben.

# 4 Implementierung

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der Kurzschluss-Berechnung in eine Software beschrieben. Diese soll in eine bereits existierende SPS-Oberfläche integriert werden. Die Erweiterung erfordert das Anlegen eines neuen Simulationsablaufs, die Möglichkeit, neue Bauteile einzufügen sowie komplexere Eingabemöglichkeiten.

## 4.1 Aufbau und Funktion von Bauteilen

Die SPS-Oberfläche basiert auf einer Bausteinlogik. Die Einzelkomponenten können untereinander verbunden werden und können durch ihre interne Logik auf einander Einfluss nehmen.

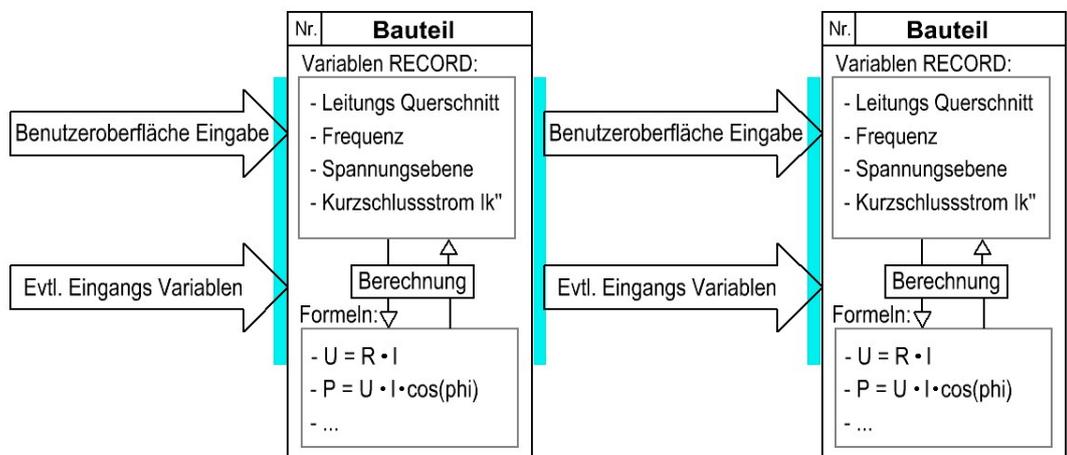


Abbildung 4.1: Allgemeiner Bausteinaufbau

Ein Bauteil hat eine eindeutige Nummer, die nicht mehrfach vergeben werden kann. Diese ist später für die Berechnung wichtig.

Die Bauteile unterscheiden sich vor allem in der Möglichkeit, als Erzeuger, Verbraucher oder Transitionen zu fungieren. Erzeuger liefern Werte und nehmen keine auf, haben also nur einen Ausgang. Transitionen sind durch einen Ein- und einen Ausgang

gekennzeichnet. Sie wandeln Eingangswerte über Berechnungs-Algorithmen in Ausgangswerte um. Verbraucher als Endbausteine zeichnen sich durch einen Eingang aus. Die Ein- und Ausgänge dieser Bausteine werden werden Kanten genannt. In jedem Baustein befindet sich eine Vielzahl von Variablen und beschreibenden Eigenschaften (Form, Größe, Eingänge usw).

Auf die Bausteine können verschiedene Methoden angewendet werden, zum Beispiel: Das verschieben der Bauteilen auf der SPS-Oberfläche oder das Kopieren und Löschen.

Für die Kurzschluss-Berechnung wurde ein großer Datenrecord im Variablenbereich angelegt. In diesem Record enthalten sind Variablen, auf die Werte (beispielsweise: Spannung, Strom, Frequenz oder Widerstände) geschrieben werden. So steht ein Bauteil im Programm stellvertretend für z.B. einen Generator, einen Motor oder eine Leitung. Über eine individuelle Eingabemaske, die im folgenden noch beschrieben wird, können Werte für die einzelnen Bauteile eingetragen werden.

Neben diesen beschreibenden Daten ist im Bausteins ein Formelblock enthalten. In diesem Formelblock sind die Berechnungsformeln untergebracht.

Je nach Bauteiltyp werden Daten vom Eingang und/oder aus der Eingabemaske eingelesen. Im Formelblock werden die Daten verarbeitet und in den Datenrecord geschrieben. Gleichzeitig stehen die berechneten Werte am Ausgang des Bausteins zur Verfügung. Diese stellen die Eingangswerte für ein neues Bauteil dar.

## 4.2 Bauteile

Die einzelnen Bauteile können über den Reiter „Bauteile“ in der SPS-Oberfläche ausgewählt werden, nach dem der 'read only' Modus deaktiviert wurde, wie auf Abbildung 4.2 dargestellt ist. Die Bauteile haben unterschiedliche Eingabemasken, die im folgenden erklärt werden.

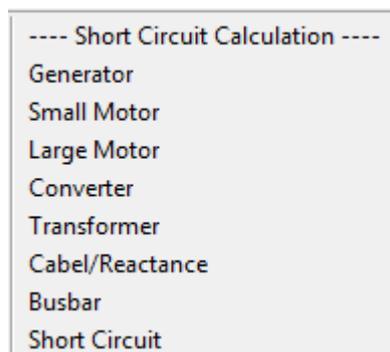


Abbildung 4.2: Auswahl der Bausteine

### 4.2.1 Generator

Der Synchrongenerator stellt generell die Versorgung für Schalttafeln und Betriebsmittel sicher. Es werden in den meisten Fällen mehrere Generatoren parallel betrieben, um eine redundante Energieversorgung sicherstellen.



Die Parameter des jeweiligen Generators werden in die Parametermaske eingetragen. Die Daten für die Berechnung werden von Werften und Herstellern bereitgestellt oder sind Datenblättern zu entnehmen. Dabei sind die Werte für die Synchronreaktanzen  $x''_d$ ,  $x'_d$ ,  $x_d$  und  $R_a$  % als bezogene Größen anzugeben. Diese sind meistens direkt vom Hersteller gegeben oder können errechnet werden. Bei der Eingabe von  $R_a$  gibt es die zusätzlich Möglichkeit, zwischen der absoluten und der bezogenen Größe zu wählen.

Name:	<input type="text" value="G 1"/>	<input type="button" value="OK"/>	<input type="button" value="Abbrechen"/>
Parameter:			
Name =	<input type="text" value="Generator 1"/>	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	Generator Name
cos(phi) =	<input type="text" value="0.8"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	cos phi
SrG [kVA] =	<input type="text" value="7200"/>	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	Apparent Power
UrG [V] =	<input type="text" value="6600"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	Nominal Voltage
IrG [kA] =	<input type="text" value="0.63"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	Nominal Current
fr [Hz] =	<input type="text" value="50"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	Frequency
Ik [kA] =	<input type="text" value="1.89"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	if av. or 3-times nom. Current)
xd'' [%] =	<input type="text" value="23.7"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	Reactance xd''
xd' [%] =	<input type="text" value="12.9"/>	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	Reactance xd'
xd [%] =	<input type="text" value="147.8"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	Reactance xd
Ra [%] =	<input type="text" value="0.5"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	(1) Resistance [%]
Ra [mOhm] =	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	(2) Resistance [mOhm]
Td'' [ms] =	<input type="text" value="21"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	Time Constant Td''
Td' [ms] =	<input type="text" value="819"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	Time Constant Td'
Tdc [ms] =	<input type="text" value="76"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	Time Constant Tdc

Abbildung 4.3: Eingabemaske Generator

Da das Anzeigen aller Parameter auf der Hauptmaske zu unübersichtlich wäre, können über die Schaltfläche 'sichtbar' bestimmte Parameter nach außen hin sichtbar gemacht werden.

### 4.2.2 Motor

Einen Großteil der Verbraucher im Schiff stellen Motoren dar, zum Beispiel Lüfter und Pumpen. Diese speisen im Kurzschlussfall ihre gespeicherte kinetische Energie in Form von Strom ins Netz ein, so dass sie als wichtige Komponente für die Kurzschluss-Berechnung zu beachten sind.



Die Parametermaske wird mit gegebenen Daten ausgefüllt. Hierbei ist zu beachten, dass bestimmte Werte angenommen werden können, falls sie nicht vorhanden sind (wie bereits im Kapitel 3.4 - Vereinfachungen durch Norm - beschrieben ist). Über die Eingabe *Load %* kann eine generelle Auslastung des Motors angegeben werden, der in der Berechnung berücksichtigt wird.

Name:	<input type="text" value="LM12"/>	<input type="button" value="OK"/>	<input type="button" value="Abbrechen"/>
Parameter:			
Name =	<input type="text" value="Jump Jet H3.2"/>	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	LMotor Name
Power [kW] =	<input type="text" value="895"/>	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	Activ Power
Nom.Vol [V] =	<input type="text" value="690"/>	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	Nominal Voltage
fr [Hz] =	<input type="text" value="60"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	Frequency
Nom.Cur [kA] =	<input type="text" value="0.45"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	Cos Phi
Load [%] =	<input type="text" value="100"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	Load
cos(phi) =	<input type="text" value="0.9"/>	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	(1) Cos
eta =	<input type="text" value="0.98"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	(1) Eta
IA/IN =	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	(1) Ia/In
rStator =	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	(2) Statorresistance
rRotor =	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	(2) Rotorresistance
xStator =	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	(2) Statorreactance
xRotor =	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	(2) Rotorreactance

Abbildung 4.4: Eingabemaske Motor

### 4.2.3 Motoren Gruppen

Mehrere kleine Motoren, die aufgrund ihrer geringen Einzelleistung nicht ins Gewicht fallen, aber aufgrund ihrer Anzahl nicht vernachlässigt werden können, dürfen zu Motorengruppen zusammengefasst werden. Als „kleine“ Motoren werden alle Motoren bezeichnet die eine Leistung von unter 100 kW bzw. weniger als 15 % der angeschlossenen Generatorleistung beziehen.



In der Parametermaske wird die gesamte Leistung aller zusammengefassten Motoren eingetragen. Der Kurzschlussstrom aus dieser Bauteilgruppe ist stark abhängig von der Anzahl und Spannungsebene der Motoren.

Name:	<input type="text" value="SM11"/>	<input type="button" value="OK"/>	<input type="button" value="Abbrechen"/>
Parameter:			
Name =	<input type="text" value="Motor Gr. B2.1"/>	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	SMotor Name
Power [kW] =	<input type="text" value="300"/>	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	Power
Ap.Pow [kVa]	<input type="text" value="380"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	Apparent Power
Urg [V] =	<input type="text" value="230"/>	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	Nominal Voltage
fr [Hz] =	<input type="text" value="50"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	Frequency
Load =	<input type="text" value="90"/>	<input type="checkbox"/> sichtbar	Load

Abbildung 4.5: Eingabemaske Motorengruppe

### 4.2.4 Umrichter

Umrichter stellen ein sehr komplexes Thema in der Kurzschluss-Berechnung dar, weil je nach Typ und Hersteller unterschiedlich Eigenschaften beachtet werden müssen. Für die Kurzschluss-Berechnung ist es unabdingbar genau Angabe über Möglichkeiten der Rückspeisung bzw. Dauer der Rückspeisung zu erlangen. Umrichter sind im Schiff häufig in Wellengeneratoren- oder Antriebsanlagen zu finden.



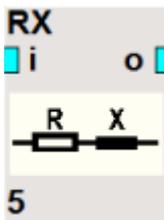
Die Parametermaske wurde auf ein sehr einfaches Model beschränkt, das unter der Angabe  $I_k/I_n$  ein individuelles Kurzschlussstrom-Verhalten auf bezogenen Nennstrom hat. Dabei wurde sich auf die am häufigst verwendeten Umrichtertypen bezogen.

Name:	CON 13	OK	Abbrechen
Parameter :			
Name =	Bow Thruster	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	Convertername
Un [V] =	690	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	Nom. Volatage
In [kA] =	0.5	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	Nom. Current
fr [Hz] =	50	<input type="checkbox"/> sichtbar	Freq.
Ik/In [%] =	150	<input type="checkbox"/> sichtbar	rate In/Ik

Abbildung 4.6: Eingabemaske Umrichter

## 4.2.5 Widerstände und Spulen

Spulen werden häufig vor große Motoren bzw. Sammelschienen eingebaut, um Ströme zu begrenzen.



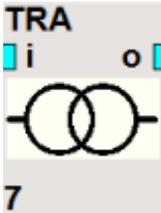
Bei der Beschreibung von Leitungen gibt es zwei Möglichkeiten: über die Länge, Querschnitt und die Anzahl der Leitungen den ohmschen und den induktiven Widerstand zu ermitteln oder über die direkte Eingabe dieser. Bei der Eingabe über Länge und Querschnitt wird auf Tabellen von Herstellern zurück gegriffen.

Name:	RX 5	OK	Abbrechen
Parameter :			
Name =	G1 to Switchboard	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	Cabelname
Q [mm <sup>2</sup> ] =	185	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	(1) Size
length [m] =	20	<input type="checkbox"/> sichtbar	(1) length
No. =	2	<input type="checkbox"/> sichtbar	(1) Parallel
R [mOhm] =		<input type="checkbox"/> sichtbar	(2) Resistance
X [mOhm] =		<input type="checkbox"/> sichtbar	(2) Reactance

Abbildung 4.7: Eingabemaske Widerstand und Spule

### 4.2.6 Transformatoren

Der Transformatoren dienen als Verbindung zwischen den unterschiedlichen Spannungsebenen. Diese reichen auf größeren Schiffen durchaus bis in den Bereich der Mittelspannung. Für die Kurzschluss-Berechnung sind Transformatoren sehr relevant, da, bedingt durch die Übersetzungsverhältnisse, größere Ströme auf der Niederspannungsseite entstehen können.



Über die Parametermaske wird die Leistung, die der Transformator liefern kann, angegeben sowie die Unter- und Oberspannungsseite. Über  $u_k$  und  $u_r$  werden die Verluste prozentual angegeben.

Name:	TRA 14	OK	Abbrechen
Parameter:			
Name =	Transformer H4.1	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	Transformatorname
SrT [kVA] =	2900	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	Apparent Power
Urt1 [V] =	6600	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	rated Primary
Urt2 [V] =	400	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	rated Secondary
uk [%] =	6	<input checked="" type="checkbox"/> sichtbar	uk
ur [%] =	1	<input type="checkbox"/> sichtbar	ur

Abbildung 4.8: Eingabemaske Transformator

### 4.2.7 Sammelschiene und Kurzschluss

Die Sammelschiene hat als Parameter die Anzahl der Eingänge, die jederzeit im Programm geändert werden kann. Der Kurzschluss hat keine Parameter und wird lediglich zur Auswertung genutzt.

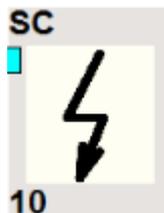


Abbildung 4.9: Bauteil Kurzschluss



Abbildung 4.10: Bauteil Sammelschienen

## 4.3 Simulationsalgorithmus

In diesem Abschnitt wird auf die eigentliche Funktionsweise der Bauteile eingegangen. Der Ablauf in der SPS-Oberfläche über ein Flussdiagramm genauer erläutert.

### 4.3.1 Programmablauf

Der Programmablauf soll eine schematische Übersicht über die Arbeitsweise des Programms geben.

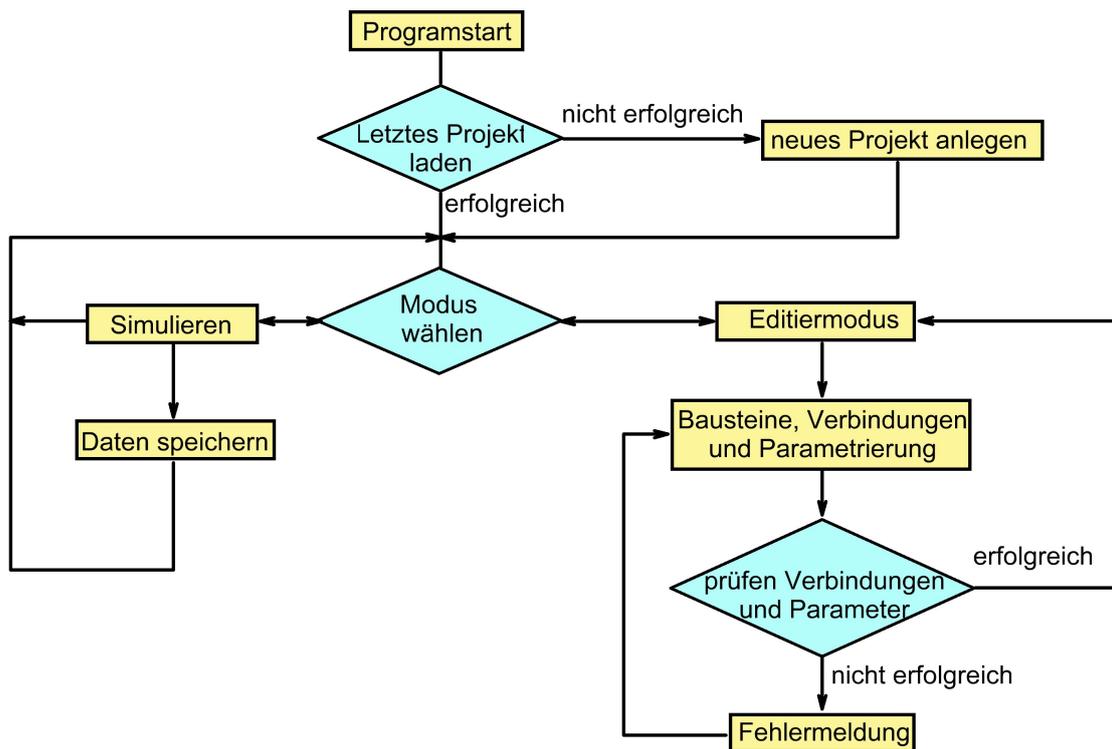


Abbildung 4.11: Flussdiagramm Programmablauf

Wie auf Abbildung 4.11 dargestellt ist, besteht der generelle Ablauf des Programms aus zwei Modi. In der Simulation werden die Ergebnisse der Bausteine ausgewertet und stehen als Daten zur Verfügung. In diesem Modus ist es nicht möglich die Parametrierung der Bausteine zu ändern. Das Gegenstück des Simulationsmodus ist der Editiermodus, in diesem können die Bausteine in der Oberfläche platziert, miteinander verbunden und parametrierung werden. Nach jedem Parametrieren eines Bausteins wird dieser auf nicht gültige Einträge kontrolliert. Bevor die Simulation gestartet werden kann, werden zudem noch die Verbindungen geprüft. Neben den beiden Hauptmodi besteht noch die Möglichkeit die Oberfläche gegen Verschieben von Bauteilen und Ändern von Parametern zu sichern.

### 4.3.2 Berechnungsreihenfolge und Berechnung

Bevor die Simulation beginnen kann, muss die Berechnungsreihenfolge festgelegt werden. Das Festlegen der Berechnungsreihenfolge ist einer der wichtigsten Schritte, bevor die eigentlich Berechnung und das Zusammenfassen beginnen kann. Dafür werden zunächst alle Bausteine selektiert und auf Ein- und Ausgänge überprüft.

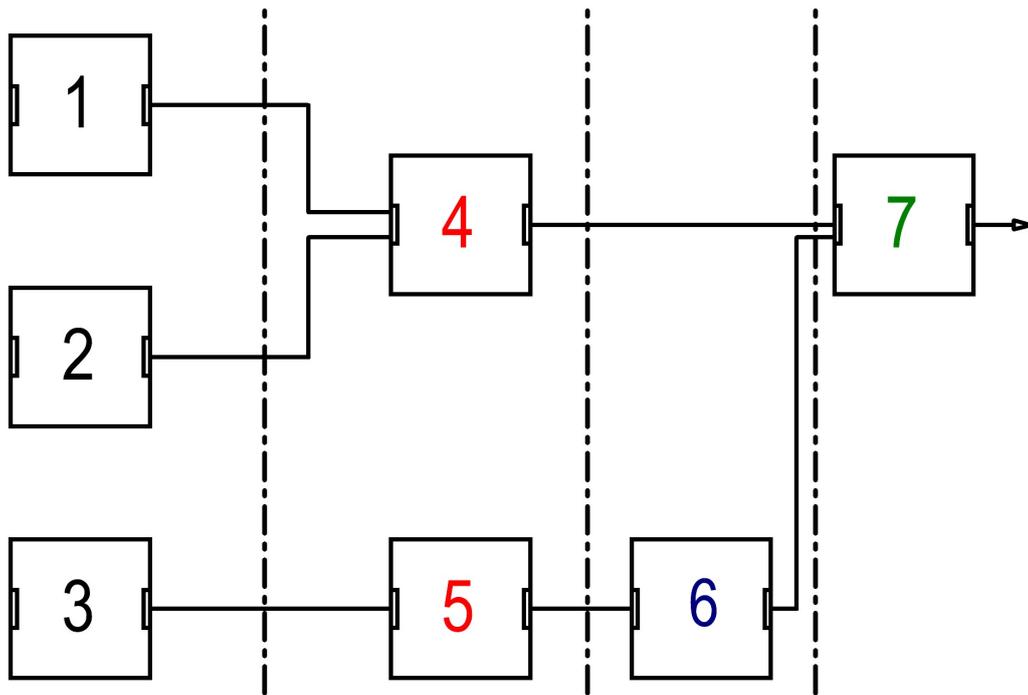


Abbildung 4.12: Festlegen der Berechnungsreihenfolge

Bauteile, die keine Eingänge haben, werden im ersten Durchlauf fortlaufend nummeriert. Da diese keine Vorgänger haben, können sie ohne Bedingungen berechnet werden. (1, 2, 3) In einem nächsten Durchlauf werden alle Bausteine geprüft, deren Vorgänger schon berechnet wurden und ebenfalls nummeriert (4, 5), Dieses Verfahren wird wiederholt, bis alle Bausteine eine Nummer haben (6, 7). Die Bausteine werden ihrer Reihenfolge nach in einem Array abgelegt und zu einem später Zeitpunkt, in der Simulationsphase, ihrer Reihenfolge nach abgearbeitet. Jeder Baustein hat einen eigenen Funktionsbereich, der nach der Nummerierung abgearbeitet wird und generell neue Daten für seinen Nachfolger zur Verfügung stellt.

### 4.3.3 Zusammenfassen von Bauteilen

Mit dem Berechnen der einzelnen Bauteile ist die Berechnung noch nicht abgeschlossen. Über das nummerierte Abarbeiten der Bauteile wird eine komplexe Schaltung Stück für Stück weiter vereinfacht, bis am Ende ein sehr einfaches Ersatzschaltbild entsteht, das nur noch einen einzigen Ersatzgenerator und dem Kurzschluss enthält. Dies Prinzip funktioniert wie folgt: Im ersten Schritt werden die Ersatzgeneratoren  $G1^*$ ,  $G2^*$  und  $G3^*$  gebildet:

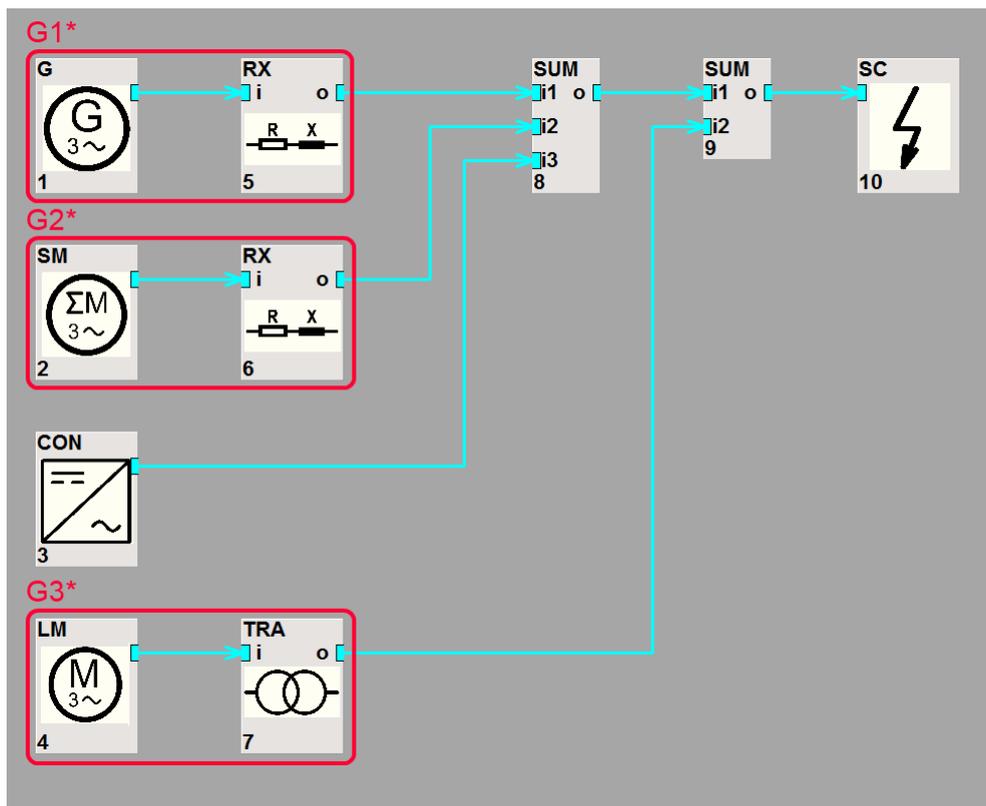
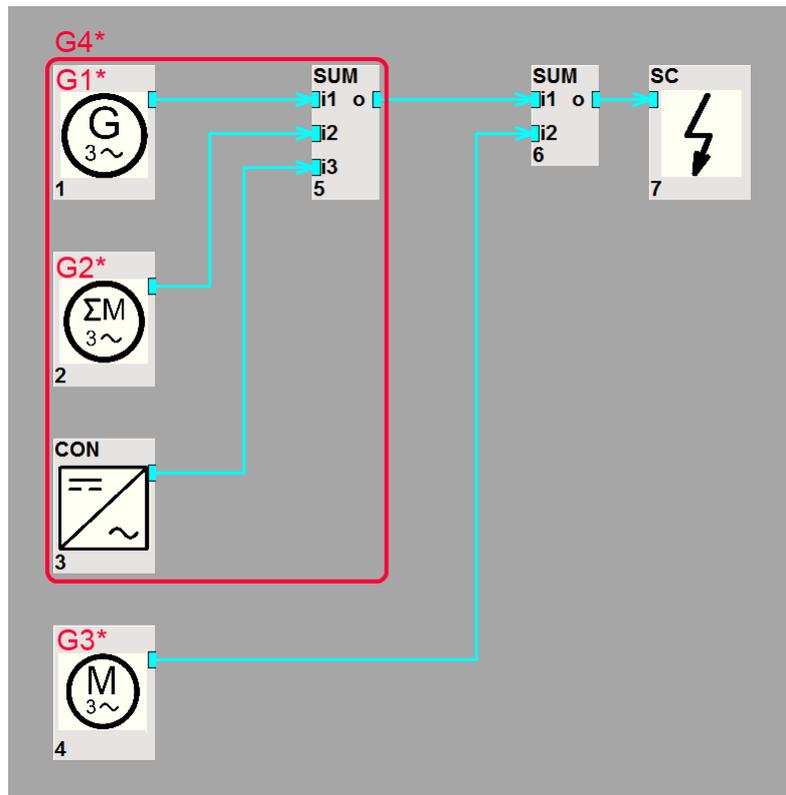
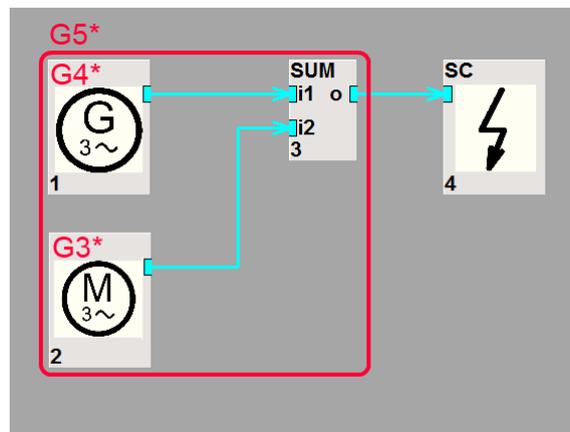


Abbildung 4.13: Berechnungsbeispiel  $G1^*$ ,  $G2^*$  und  $G3^*$

Dieses Verfahren wird nun Schritt für Schritt weiter durchgeführt.

Abbildung 4.14: Berechnungsbeispiel  $G4^*$ 

Durch weiteres Zusammenfassen entsteht Ersatzgenerator  $G5^*$ :

Abbildung 4.15: Berechnungsbeispiel  $G5^*$

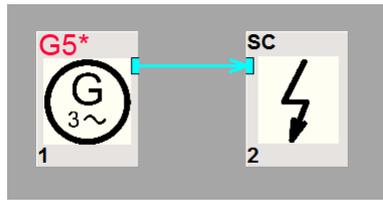


Abbildung 4.16: Zusammengefasster Ersatzgenerator  $G5^*$

Zuletzt ergibt sich ein großer Ersatzgenerator, der auf den Kurzschluss speist. In diesem sind alle Größen der Bauelemente vereint; er repräsentiert das gesamte Netz bezogen auf den Kurzschluss. Dieses Zusammenfassungsverfahren wird durch das gezielte Abarbeiten der Berechnungsreihenfolge verwirklicht.

#### 4.3.4 Funktionsweise der unidirektionalen Bauteilen

Die vorgegebene SPS-Oberfläche bietet nicht nur Vorteile beim Entwickeln der Software. Der größte Schwäche der Software sind die unidirektionalen Bausteine, die nur in eine Richtung arbeiten können. Dieser Umstand bringt einige Einschränkungen mit sich, insbesondere bei der Platzierung des Kurzschlusses. So muss dieser immer als letzter Baustein am 'Ende' des Baustein-Aufbau angeordnet werden. Dieses Problem ist durch Verschieben der Bausteine lösbar, ist aber nicht komfortabel.

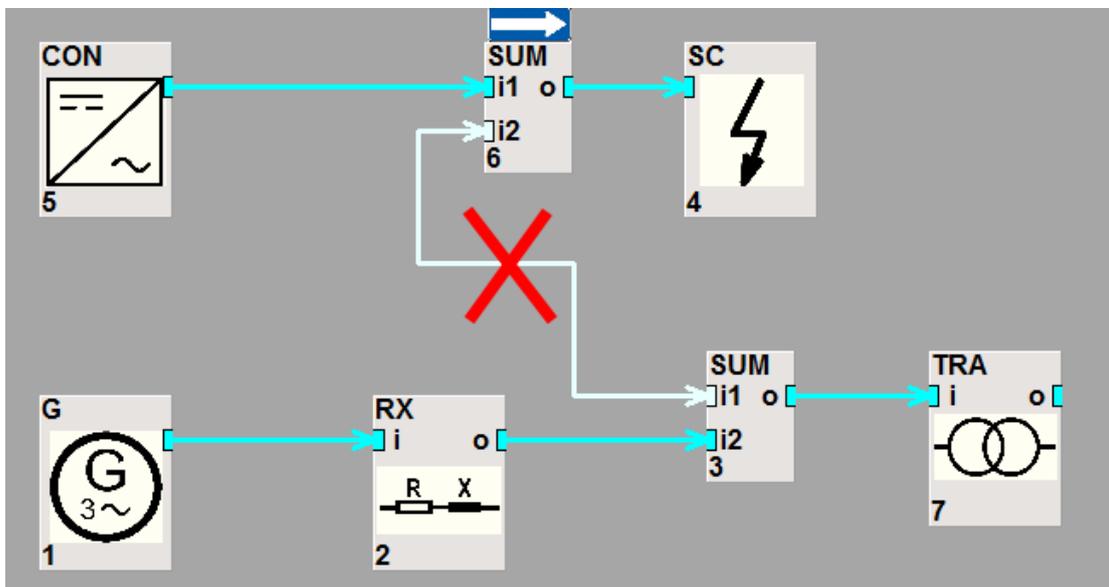


Abbildung 4.17: Unidirektionale Bausteinproblem

Wie auf Abbildung: 4.17 dargestellt ist, lässt das Programm eine solche rückwärts gerichtete Verbindung der Bausteine nicht zu. Das Simulationsergebnis hat keinen Bezug zum Aufbau und liefert somit keine richtigen Ergebnisse.

## 4.4 Ausgabe- und Dokumentationsmöglichkeit

Die folgenden Ausgabemasken können im Simulationsmodus durch Anklicken der entsprechenden Bauteile aufgerufen werden.

### 4.4.1 Kurzschluss

Nachdem der Aufbau und die Parametrierung der einzelnen Bauteile abgeschlossen ist kann die Simulation gestartet werden. Die Ergebnisse, die für den Kurzschlussstrom berechnet werden erscheinen in einer extra Maske.

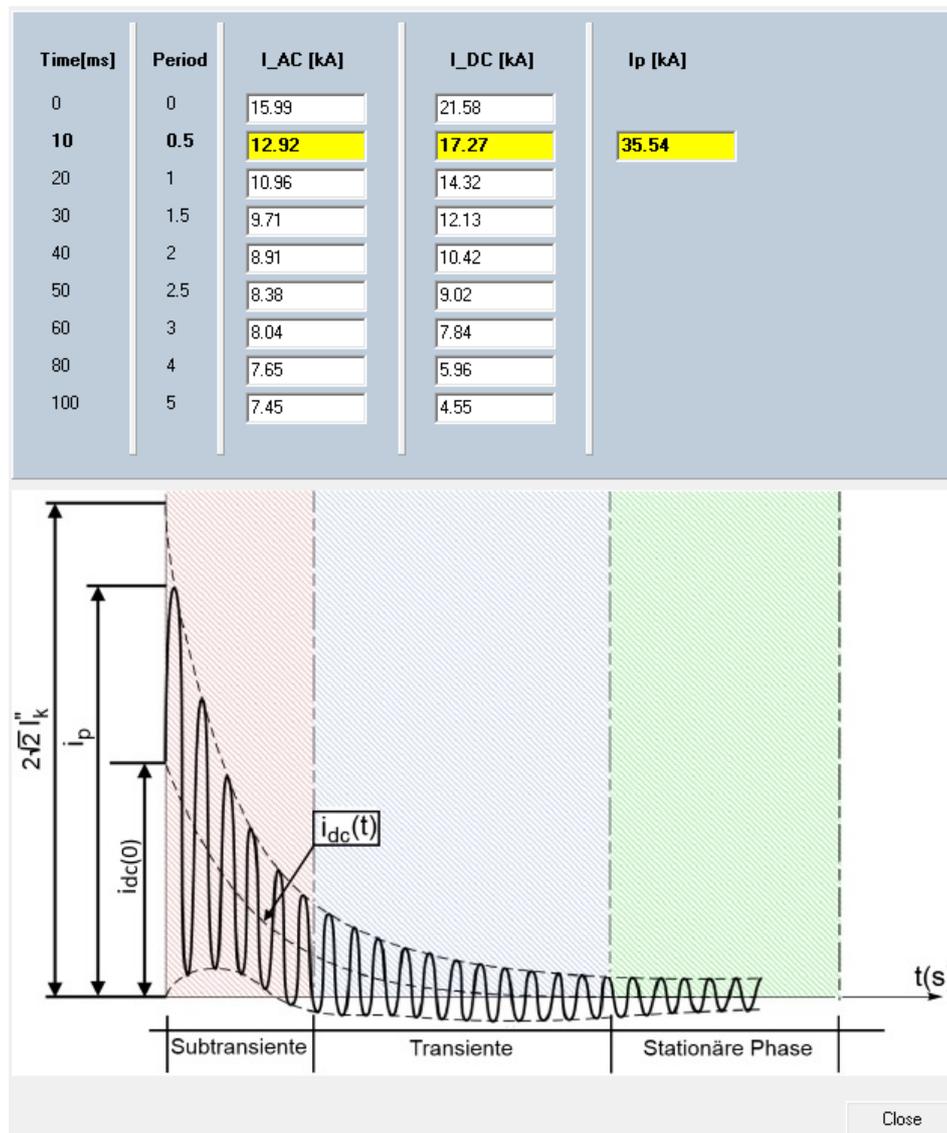


Abbildung 4.18: Ausgabemaske Kurzschluss

Schutzorgane schalten im Kurzschlussfall nicht beliebig schnell. Wie in der Maske in Abbildung 4.18 dargestellt ist, werden die Werte bei 10 ms als realistische Grundlage für die Auslegung von Schutzorganen gewählt. Das Diagramm zeigt den allgemeinen Aufbau eines Generatornahen Kurzschlusses und welche Ströme wo zu finden sind.

#### 4.4.2 Ersatzgenerator

Durch das Zusammenschalten von vielen Systemkomponenten, können unter Umständen sehr große komplexe Netze entstehen. Dafür wurde eine Funktion für Sammelschienen implementiert. Durch das Anwählen der Sammelschienen in der Simulation wird eine weitere Maske geöffnet. Diese Maske enthält die Werte des Ersatzgenerators bis zu diesem Punkt, also alle vor der Sammelschiene befindlichen Systemkomponenten.

$X''_d$	237.47		
$X'_d$	492.83		
$X_d$	729.7		
$I_{ac(0)}$ [kA]	15.99	$I_{dc(0)}$ [kA]	21.58
$I_{ac(0.5)}$ [kA]	12.92	$I_{dc(0.5)}$ [kA]	17.27
$I_{ac(1)}$ [kA]	10.96	$I_{dc(1)}$ [kA]	14.32
$I_{ac(3)}$ [kA]	8.04	$I_{dc(3)}$ [kA]	7.84
$I''_k$	15.99	$T''_d$	21.87
$I'_k$	7.73	$T'_d$	654.66
$I_k$	5.22	$T_{dc}$	37.14
$Z''$	238.34		
$Z'$	493.25		
$Z$	729.98		
$R$	20.35		
		$i_p$ [kA]	35.54

Close

Abbildung 4.19: Ausgabemaske Ersatzgenerator

### 4.4.3 Dokumentation

Für die Dokumentation eines Kurzschlussfalls besteht die Möglichkeit, nach jeder Simulation die berechneten Ergebnisse zu speichern. Dies wird über das Anlegen einer Textdatei realisiert. In dieser Datei enthalten sind alle auf der SPS-Oberfläche angelegten Bauteile mit ihren jeweiligen Parametern. Die Bauteile werden nach ihrem Aufbau sortiert in die Datei gespeichert.

Neben den Bauteilen werden auch die Simulationsergebnisse und Teilergebnisse in die Datei gespeichert. Diese Datei wird von einem Excel-Makro geöffnet. Dieses in Visual Basic geschriebene Makro erkennt die einzelnen Bauteile in der Datei. Die Bauteile und ihre Charakteristika werden in vorgefertigte Bauteil-spezifische Tabellen geschrieben. Das Dokument erweitert sich selbstständig nach Anzahl der Bauteile und schließt mit den Gesamtergebnissen der Simulation. Neben den Simulationsergebnissen enthält die Datei eine Übersichtszeichnung der Gesamtschaltung.

1/A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
2	<b>Failure F1</b>										
3											
4											
5	<b>Generator 1</b>										
6	<b>S<sub>n</sub></b>	12000 kVA		<b>R<sub>s</sub></b>		mOhm		<b>T<sub>d</sub><sup>''</sup></b>		21 ms	
7	cos phi	0,8		r <sub>s</sub>		0,5 %		<b>T<sub>d</sub><sup>'</sup></b>		819 ms	
8	<b>U<sub>n</sub></b>	6600 V		<b>x<sub>d</sub><sup>''</sup></b>		12,9 %		<b>T<sub>dc</sub></b>		76 ms	
9	<b>I<sub>n</sub></b>	0,63 kA		<b>x<sub>d</sub><sup>'</sup></b>		23,4 %					
10	<b>f<sub>n</sub></b>	50 Hz		<b>x<sub>d</sub></b>		147,8 %					
11	<b>I<sub>k</sub></b>	1,89 kA									
12				<b>I<sub>AC</sub></b>		7,13 kA		<b>i<sub>p</sub></b>		20,3 kA	
13											
14											
15	<b>Generator 2</b>										
16	<b>S<sub>n</sub></b>	7200 kVA		<b>R<sub>s</sub></b>		mOhm		<b>T<sub>d</sub><sup>''</sup></b>		21 ms	
17	cos phi	0,8		r <sub>s</sub>		0,5 %		<b>T<sub>d</sub><sup>'</sup></b>		819 ms	
18	<b>U<sub>n</sub></b>	6600 V		<b>x<sub>d</sub><sup>''</sup></b>		12,9 %		<b>T<sub>dc</sub></b>		76 ms	
19	<b>I<sub>n</sub></b>	0,63 kA		<b>x<sub>d</sub><sup>'</sup></b>		23,7 %					
20	<b>f<sub>n</sub></b>	50 Hz		<b>x<sub>d</sub></b>		147,8 %					
21	<b>I<sub>k</sub></b>	1,89 kA									
22				<b>I<sub>AC</sub></b>		4,45 kA		<b>i<sub>p</sub></b>		12,45 kA	
23											
24											
25	<b>Generator 3</b>										
26	<b>S<sub>n</sub></b>	3600 kVA		<b>R<sub>s</sub></b>		mOhm		<b>T<sub>d</sub><sup>''</sup></b>		23 ms	
27	cos phi	0,8		r <sub>s</sub>		0,5 %		<b>T<sub>d</sub><sup>'</sup></b>		671 ms	
28	<b>U<sub>n</sub></b>	6600 V		<b>x<sub>d</sub><sup>''</sup></b>		12,7 %		<b>T<sub>dc</sub></b>		77 ms	
29	<b>I<sub>n</sub></b>	0,31 kA		<b>x<sub>d</sub><sup>'</sup></b>		24 %					
30	<b>f<sub>n</sub></b>	50 Hz		<b>x<sub>d</sub></b>		165,2 %					
31	<b>I<sub>k</sub></b>	0,94 kA									
32				<b>I<sub>AC</sub></b>		2,27 kA		<b>i<sub>p</sub></b>		6,33 kA	
33											
34											

34	<b>Motor</b>					
35	$P_n$	500 kW	Load	100 %	$r_{Stator}$	%
36	$U_n$	6600 V	$\cos \phi$	0,8	$r_{Rotor}$	%
37	$I_n$	0,5 kA	$\eta$		$X_{Stator}$	%
38	$f_n$	50 Hz			$X_{Rotor}$	%
39	$I_A/I_n$					
40			$I_{AC}$	1,75 kA	$i_p$	4,52 kA
41	<b>Leitung2</b>					
42	cross-sect.	185 mm <sup>2</sup>	$R_C$		mOhm	
43	length	35 m	$X_C$		mOhm	
44	No. of cables	2				
45			$I_{AC}$	7,11 kA	$i_p$	20,13 kA
46	<b>Time dependent short circuit current</b>					
47	time [ms]	periods	$I_{AC}$ [kA]	$i_{DC}$ [kA]	$i_p$ [kA]	
48	0	0	19,22	26,15	53,32	
49	10	0,5	15,58	21,24	43,27	
50	20	1	13,26	17,76	36,51	
51	30	1,5	11,77	15,12	31,77	
52	40	2	10,81	13,02	28,31	
53	50	2,5	10,19	11,27	25,68	
54	60	3	9,77	9,79	23,62	
55	80	4	9,29	7,44	20,58	
56	100	5	9,04	5,66	18,44	
57						
58						
59						
60						
61						
62						
63						
64						
65						
SHORT CIRCUIT CALCULATION ACCORDING IEC 61 363					Zg-Nr.	271.050.599.BU
					Ers.	
					Urspr.	
					page	1
					of	1

Abbildung 4.20: Dokumentengeneration in Excel aus Delphi

Für jeden Kurzschlussfall, der in der Projektspezifikation festgehalten ist, wird eine solche Dokumentation über die beteiligten Bauteile und ihrer Ergebnisse angelegt. Das Excel-Programm verfügt auch über die Funktion, mehrere Datensätze aus der SPS-Oberfläche zu importieren.

# 5 Verifizierung

## 5.1 Beispiel

### 5.1.1 Aufgabe

Um den mathematischen Aufbau und die Berechnungsreihenfolge zu verdeutlichen, ist an dieser Stelle ein Versuchsaufbau berechnet worden.

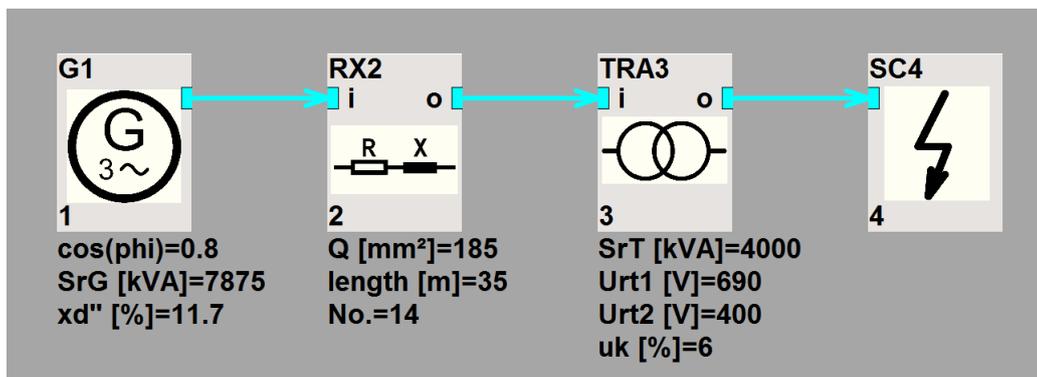


Abbildung 5.1: Rechenbeispiel: Generator, Leitung, Transformator

### 5.1.2 Berechnung Synchrongenerator

Die Leistung des Synchrongenerator wird über mehrere Leitungen auf den Transformator geführt. Dieser wandelt die Spannung von 690 V auf 230 V. Auf der Niederspannungsseite soll ein Kurzschluss berechnet werden. Dafür wird zunächst der Generator berechnet

Generatordaten aus dem Datenblatt des Herstellers:

$$S_{nG} = 4175 \text{ kVA} \quad \cos(\varphi) = 0.8 \quad U_{nG} = 690 \text{ V} \quad I_{nG} = 3.49 \text{ kA} \quad f = 50 \text{ Hz}$$

$$I_k = 10.48 \text{ kA} \quad R_{aG} = 13.75 \text{ m}\Omega \quad x_d'' = 18.00 \% \quad x_d' = 32.10 \% \quad x_d = 252.6 \%$$

$$T_d'' = 19 \text{ ms} \quad T_d' = 701 \text{ ms} \quad T_{dc} = 87 \text{ ms}$$

Für die Berechnung werden die Formeln aus Abschnitt 3.2 verwendet:  
Zunächst die Wirkleistung  $P_{rG}$ :

$$P_{rG} = S_{rG} \cdot \cos(\varphi) = 4175 \text{ kVA} \cdot 0.8 = 3340 \text{ kW} \quad (5.1)$$

Die subtransiente Reaktanz  $X_d''$

$$X_d'' = \frac{x_d'' \cdot U_{nG}^2}{S_{nG}} = \frac{18 \% \cdot (690 \text{ V})^2}{4175 \text{ kVA}} = 20.53 \text{ m}\Omega \quad (5.2)$$

Die transiente Reaktanz  $X_d'$

$$X_d' = \frac{x_d' \cdot U_{nG}^2}{S_{nG}} = \frac{32.1 \% \cdot (690 \text{ V})^2}{4175 \text{ kVA}} = 36.61 \text{ m}\Omega \quad (5.3)$$

Die Reaktanz  $X_d$

$$X_d = \frac{x_d \cdot U_{nG}^2}{S_{nG}} = \frac{252.6 \% \cdot (690 \text{ V})^2}{4175 \text{ kVA}} = 288.05 \text{ m}\Omega \quad (5.4)$$

Subtransiente Impedanz des Synchrongenerators:

$$Z_d'' = \sqrt{R_a^2 + X_d''^2} = \sqrt{(13.75 \text{ m}\Omega)^2 + (20.53 \text{ m}\Omega)^2} = 24.71 \text{ m}\Omega \quad (5.5)$$

Transiente Impedanz des Synchrongenerators:

$$Z_d' = \sqrt{R_a^2 + X_d'^2} = \sqrt{(13.75 \text{ m}\Omega)^2 + (36.61 \text{ m}\Omega)^2} = 39.1 \text{ m}\Omega \quad (5.6)$$

Impedanz des Synchrongenerators:

$$Z_d = \sqrt{R_a^2 + X_d^2} = \sqrt{(13.75 \text{ m}\Omega)^2 + (288.05 \text{ m}\Omega)^2} = 288.37 \text{ m}\Omega \quad (5.7)$$

Subtransiente Spannung der Synchronmaschine in Querrichtung (q-Achse)

$$E_q'' = \sqrt{\left(\frac{U_{nG}}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\varphi) + R_a \cdot I_{nG}\right)^2 + \left(\frac{U_{nG}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\varphi) + X_d'' \cdot I_{nG}\right)^2} \quad (5.8)$$

$$E_q'' = \sqrt{\left(\frac{690 \text{ V}}{\sqrt{3}} \cdot 0.8 + 13.75 \text{ m}\Omega \cdot 3.49 \text{ kA}\right)^2 + \left(\frac{690 \text{ V}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{1 - (0.8)^2} + 20.53 \text{ m}\Omega \cdot 3.49 \text{ kA}\right)^2}$$

$$E_q'' = 480.67 \text{ V}$$

Transiente Spannung der Synchronmaschine in Querrichtung (q-Achse)

$$E'_q = \sqrt{\left(\frac{U_{nG}}{\sqrt{3}} \cdot \cos(\varphi) + R_a \cdot I_{nG}\right)^2 + \left(\frac{U_{nG}}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\varphi) + X'_d \cdot I_{nG}\right)^2} \quad (5.9)$$

$$E'_q = \sqrt{\left(\frac{690 \text{ V}}{\sqrt{3}} \cdot 0.8 + 13.75 \text{ m}\Omega \cdot 3.49 \text{ kA}\right)^2 + \left(\frac{690 \text{ V}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{1 - (0.8)^2} + 36.61 \text{ m}\Omega \cdot 3.49 \text{ kA}\right)^2}$$

$$E'_q = 518.76 \text{ V}$$

Subtransienter Kurzschlussstrom des Synchrongenerators  $I''_k$ :

$$I''_k = \frac{E'_q}{Z''_d} = \frac{480.67 \text{ V}}{20.53 \text{ m}\Omega} = 19.45 \text{ kA} \quad (5.10)$$

Transienter Kurzschlussstrom des Synchrongenerators  $I'_k$ :

$$I'_k = \frac{E'_q}{Z'_d} = \frac{518.76 \text{ V}}{39.1 \text{ m}\Omega} = 13.27 \text{ kA} \quad (5.11)$$

Anfangswert des Gleichspannungsanteils des Kurzschlussstroms  $i_{dc}$ :

$$i_{dc}(t) = \sqrt{2} \cdot (I''_k - I_{nG} \cdot \sin(\varphi)) \cdot e^{-\frac{t}{T_{DC}}} \quad (5.12)$$

Wechselspannungsanteil des Kurzschlussstroms  $i_{ac}$

$$i_{ac}(t) = (I''_k - I'_k) \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} + (I'_k - I_k) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + I_k \quad (5.13)$$

Der Stoßkurzschlussstrom  $i_p$

$$i_p = \sqrt{2} \cdot I_{ac}(t) + i_{dc}(t) \quad (5.14)$$

Für die zeitabhängigen Ströme ergibt sich folgende Tabelle:

### 5.1.3 Zusammenfassen von Synchrongenerator und Leitung

Folgend wird der Synchrongenerator mit der Leitung zusammen gefasst. Die Werte für die Leitung betragen:

$$q = 185 \text{ mm}^2 \quad l = 25 \text{ m} \quad n = 12 \quad (5.15)$$

**Tabelle 5.1:** Zeitliche Kurzschlussströme Synchrongenerator

t[ms]	Periode	$i_{ac}$ [kA]	$i_{dc}$ [kA]	$i_p$ [kA]
0	0,0	19,45	24,55	52,06
10	0,5	17,16	2,99	27,26
20	1,0	15,69	0,36	22,55
30	1,5	14,74	0,04	20,9
40	2,0	14,13	0,01	19,99
50	2,5	13,73	0,00	19,42
60	3,0	13,47	0,00	19,04
80	4,5	13,16	0,00	18,61
100	5,0	13,00	0,00	18,38

Über eine spezifische Leitungstabelle ergeben sich für diesen Leitungstyp mit einem Querschnitt von  $185 \text{ mm}^2$  und einer Frequenz von 50 Hz folgende Werte:

$$rK = 0,106 \text{ m}\Omega/\text{km} \quad xK = 0,072 \text{ m}\Omega/\text{km}$$

Daraus ergibt sich für die Leitungslänge und die Anzahl der Leitungen  $n$  über die Formel:

$$R_L = \frac{rK \cdot l}{n} = \frac{0,106 \text{ m}\Omega/\text{km} \cdot 25 \text{ m}}{12} = 0,2208 \text{ m}\Omega \quad (5.16)$$

$$X_L = \frac{xK \cdot l}{n} = \frac{0,072 \text{ m}\Omega/\text{km} \cdot 25 \text{ m}}{12} = 0,15 \text{ m}\Omega \quad (5.17)$$

Diese Werte werden zur Synchronimpedanz jeweils addiert:

$$R_a^* = R_{aG} + R_L = 13,97 \text{ m}\Omega \quad X_d''^* = X_d'' + X_L = 20,68 \text{ m}\Omega \quad (5.18)$$

$$X_d'^* = X_d' + X_L = 36,76 \text{ m}\Omega \quad X_d^* = X_d + X_L = 288,2 \text{ m}\Omega \quad (5.19)$$

Durch diese Änderung müssen alle Rechenschritte wiederholt werden, die beim Synchrongenerator gemacht wurden. Zusätzlich müssen die Zeitkonstanten angepasst werden:

$$Z_d''^* = 24,95 \text{ m}\Omega \quad Z_d'^* = 39,32 \text{ m}\Omega \quad Z_d^* = 288,32 \text{ m}\Omega \quad (5.20)$$

$$E_q''^* = 481,6 \text{ V} \quad E_q'^* = 518,76 \text{ V} \quad (5.21)$$

$$I_k''^* = 19,30 \text{ kA} \quad I_k'^* = 13,19 \text{ kA} \quad (5.22)$$

Anpassen der Zeitkonstanten:

$$T_d''^* = \frac{[R_a^{*2} + X_d''^{*2}] \cdot X_d' \cdot T_d''}{[R_a^{*2} + X_d''^* \cdot X_d'] \cdot X_d''} \quad (5.23)$$

$$T_d''^* = \frac{[(13,97 \text{ m}\Omega)^2 + (20,68 \text{ m}\Omega)^2] \cdot 36,61 \text{ m}\Omega \cdot 19 \text{ ms}}{[(13,97 \text{ m}\Omega)^2 + 20,68 \text{ m}\Omega \cdot 36,76 \text{ m}\Omega] \cdot 20,53 \text{ m}\Omega} = 22,09 \text{ ms}$$

$$T_d'^* = \frac{[R_a^{*2} + X_d'^{*2}] \cdot X_d \cdot T_d'}{[R_a^{*2} + X_d'^* \cdot X_d^*] \cdot X_d'} \quad (5.24)$$

$$T_d'^* = \frac{[(13,97 \text{ m}\Omega)^2 + (36,76 \text{ m}\Omega)^2] \cdot 288,2 \text{ m}\Omega \cdot 701 \text{ ms}}{[(13,97 \text{ m}\Omega)^2 + 36,76 \text{ m}\Omega \cdot 288,2 \text{ m}\Omega] \cdot 36,76 \text{ m}\Omega} = 790,58 \text{ ms}$$

$$T_{dc}^* = \frac{X_d''^*}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_a^*} = \frac{20,68 \text{ m}\Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 13,97 \text{ m}\Omega} = 4,71 \text{ ms} \quad (5.25)$$

Für die zeitabhängigen Ströme ergibt sich folgende neue Werte:

**Tabelle 5.2:** Zeitliche Kurzschlussströme Synchrongenerator und Leitung

t[ms]	Periode	$i_{ac}$ [kA]	$i_{dc}$ [kA]	$i_p$ [kA]
0	0,0	19,30	24,33	51,62
10	0,5	17,04	2,91	27,01
20	1,0	15,59	0,35	22,40
30	1,5	14,66	0,04	20,78
40	2,0	14,06	0,00	19,89
50	2,5	13,66	0,00	19,32
60	3,0	13,40	0,00	18,95
80	4,5	13,10	0,00	18,52
100	5,0	12,94	0,00	18,29

### 5.1.4 Zusammenfassen mit Transformator

Im nächsten Schritt wird der Ersatzgenerator, bestehend aus Synchrongenerator und Leitung, über den Transformator zusammen verschaltet und zu einem neuen Ersatzgenerator zusammen gefasst.

Daten des Transformators:

$$U_{nT1} = 690 \text{ V} \quad U_{nT2} = 400 \text{ V} \quad S_{nT} = 4000 \text{ kVA} \quad u_k = 6 \% \quad u_r = 1 \%$$

Als erstes wird das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  bestimmt:

$$\ddot{u} = \frac{U_{nT2}}{U_{nT1}} = \frac{400 \text{ V}}{690 \text{ V}} = 0,5797 \quad (5.26)$$

Weiter werden die Reaktanzen und der Innenwiderstand von Generator und Leitung auf die Unterspannungsseite umgerechnet:

$$R_{aT} = R_a^* \cdot \ddot{u}^2 = 13,97 \text{ m}\Omega \cdot 0,5797^2 = 4,695 \text{ m}\Omega \quad (5.27)$$

$$X''_{dT} = X''_d^* \cdot \ddot{u}^2 = 20,68 \text{ m}\Omega \cdot 0,5797^2 = 6,9496 \text{ m}\Omega \quad (5.28)$$

$$X'_{dT} = X'_d^* \cdot \ddot{u}^2 = 36,76 \text{ m}\Omega \cdot 0,5797^2 = 12,353 \text{ m}\Omega \quad (5.29)$$

$$X_{dT} = X_d^* \cdot \ddot{u}^2 = 288,2 \text{ m}\Omega \cdot 0,5797^2 = 96,85 \text{ m}\Omega \quad (5.30)$$

Für die Reaktanzen und den Transformator Innenwiderstand ergeben sich folgende Werte für die Unterspannungsseite:

$$Z_T = u_k \cdot \frac{U_{nT2}^2}{S_{nT}} = 6\% \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{4000 \text{ kVA}} = 2,4 \text{ m}\Omega \quad (5.31)$$

$$R_T = u_r \cdot \frac{U_{nT2}^2}{S_{nT}} = 1\% \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{4000 \text{ kVA}} = 0,4 \text{ m}\Omega \quad (5.32)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{(2,4 \text{ m}\Omega)^2 - (0,4 \text{ m}\Omega)^2} = 2,366 \text{ m}\Omega \quad (5.33)$$

Die Reaktanzen und Widerstände werden summiert:

$$R_{aT}^* = R_{aT} + R_T = 4,695 \text{ m}\Omega + 0,4 \text{ m}\Omega = 5,095 \text{ m}\Omega \quad (5.34)$$

$$X''_{dT}^* = X''_{dT} + X_T = 6,9496 \text{ m}\Omega + 2,366 \text{ m}\Omega = 9,3156 \text{ m}\Omega \quad (5.35)$$

$$X'_{dT}^* = X'_{dT} + X_T = 12,353 \text{ m}\Omega + 2,366 \text{ m}\Omega = 14,719 \text{ m}\Omega \quad (5.36)$$

$$X_{dT}^* = X_{dT} + X_T = 96,85 \text{ m}\Omega + 2,366 \text{ m}\Omega = 99,216 \text{ m}\Omega \quad (5.37)$$

Aus Widerstand und Reaktanzen ergibt sich folgende gesamt Impedanz:

$$Z''_{dT}^* = \sqrt{(R_{aT}^*)^2 + (X''_{dT}^*)^2} = \sqrt{(5,095 \text{ m}\Omega)^2 + (9,3156 \text{ m}\Omega)^2} = 10,617 \text{ m}\Omega \quad (5.38)$$

$$Z'_{dT}^* = \sqrt{(R_{aT}^*)^2 + (X'_{dT}^*)^2} = \sqrt{(5,095 \text{ m}\Omega)^2 + (14,719 \text{ m}\Omega)^2} = 15,576 \text{ m}\Omega \quad (5.39)$$

$$Z_{dT}^* = \sqrt{(R_{aT}^*)^2 + (X_{dT}^*)^2} = \sqrt{(5,095 \text{ m}\Omega)^2 + (99,216 \text{ m}\Omega)^2} = 99,347 \text{ m}\Omega \quad (5.40)$$

Die Zeitkonstanten werden über folgende Formeln neu angepasst:

$$T''_{dT} = \frac{(Z''_{dT})^2 \cdot X'_{dT} \cdot T''_d}{(R_{dT}^*{}^2 + X''_{dT} \cdot X'_{dT}) \cdot X''_{dT}} \quad (5.41)$$

$$T''_{dT} = \frac{(10,617 \text{ m}\Omega)^2 \cdot 14,719 \text{ m}\Omega \cdot 22,09 \text{ ms}}{((5,095 \text{ m}\Omega)^2 + 9,3156 \text{ m}\Omega \cdot 15,553 \text{ m}\Omega) \cdot 9,3156 \text{ m}\Omega} = 23,03 \text{ ms}$$

$$T'_{dT} = \frac{(Z'_{dT})^2 \cdot X_{dT} \cdot T'_d}{(R_{dT}^*{}^2 + X'_{dT} \cdot X_{dT}) \cdot X'_{dT}} \quad (5.42)$$

$$T'_{dT} = \frac{(15,576 \text{ m}\Omega)^2 \cdot 99,216 \text{ m}\Omega \cdot 790,58 \text{ ms}}{((5,095 \text{ m}\Omega)^2 + 14,719 \text{ m}\Omega \cdot 99,216 \text{ m}\Omega) \cdot 14,719 \text{ m}\Omega} = 869,86 \text{ ms}$$

$$T_{dcT} = \frac{X''_{dT}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_{dT}^*} = \frac{9,3156 \text{ m}\Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 5,095 \text{ m}\Omega} = 5,82 \text{ ms} \quad (5.43)$$

Spannung über das Übersetzungsverhältnis:

$$E_T = U_{nT1} \left( \frac{U_{nT2}}{U_{nT1}} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = 690 \text{ V} \cdot \left( \frac{400 \text{ V}}{690 \text{ V}} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = 230,94 \text{ V} \quad (5.44)$$

Die resultierenden Ströme in den Außenleitern:

$$I''_{kT} = \frac{E_T}{Z''_{dT}} = \frac{230,94 \text{ V}}{10,617 \text{ m}\Omega} = 21,75 \text{ kA} \quad (5.45)$$

$$I'_{kT} = \frac{E_T}{Z'_{dT}} = \frac{230,94 \text{ V}}{15,576 \text{ m}\Omega} = 14,83 \text{ kA} \quad (5.46)$$

$$I_{kT} = \frac{E_T}{Z_{dT}^*} = \frac{230,94 \text{ V}}{99,347 \text{ m}\Omega} = 2,32 \text{ kA} \quad (5.47)$$

$$I_{dcT} = \sqrt{2} \cdot I''_{kT} = \sqrt{2} \cdot 21,75 \text{ kA} = 30,76 \text{ kA} \quad (5.48)$$

Gleichspannungsanteil des Kurzschlussstroms  $i_{dc}$

$$i_{dc}(t) = I_{dcT} \cdot e^{-\frac{t}{T_{dcT}}} \quad (5.49)$$

Wechselspannungsanteil des Kurzschlussstroms  $i_{ac}$

$$i_{ac}(t) = (I''_{kT} - I'_{kT}) \cdot e^{-\frac{t}{T''_{dT}}} + (I'_{kT} - I_{kT}) \cdot e^{-\frac{t}{T'_{dT}}} + I_{kT} \quad (5.50)$$

Der Stoßkurzschlussstrom  $i_p$

$$i_{pt} = \sqrt{2} \cdot I_{ac}(t) + i_{dc}(t) \quad (5.51)$$

Für die zeitabhängigen Ströme ergeben sich folgende neue Werte:

**Tabelle 5.3:** Zeitliche Kurzschlussströme Transformator

$t$ [ms]	Periode	$i_{ac}$ [kA]	$i_{dc}$ [kA]	$i_p$ [kA]
0	0,0	21,75	30,76	61,52
10	0,5	18,24	5,52	31,31
20	1,0	16,52	0,99	24,35
30	1,5	15,36	0,18	21,89
40	2,0	14,55	0,03	20,61
50	2,5	13,99	0,01	19,76
60	3,0	13,58	0,00	19,2
80	4,5	13,01	0,00	18,4
100	5,0	12,63	0,00	17,86

## 5.2 Vergleich zu anderen Programmen

### 5.2.1 Excel-Berechnungstabelle

Wie eingangs erwähnt, wurde die Kurzschluss-Berechnung früher durch ein Excel-Programm realisiert. Diese Berechnung beruht ebenfalls auf der IEC Norm und führt zu den gleichen Ergebnissen wie im Beispiel 5.1. Dabei können leichte Rundungsfehler entstehen, da Excel selbst rundet bzw. eine verkürzte Darstellung wählt. Exemplarisch wird nur die erste Seite der Berechnung gezeigt.

Die Excel-Tabellen haben für jedes Bauteil ein eigenes Standard-Datenblatt, das das Bauteil repräsentiert. Die einzelnen Fehlermöglichkeiten werden verwirklicht durch das Erzeugen von Ersatzgeneratoren. Diese verweisen durch Seitenzahlen auf die ursprünglichen Bauteile. Größeren Berechnungen umfassen für eine Anlage durchaus bis zu 100 Seiten, die wie eine Baumstruktur aufgebaut sind. An unterstem Anfang befinden sich alle Bauteile die durch Zusammenfassen am Ende einen großen Ersatzgenerator darstellen, der auf den Kurzschluss speist. Das Excel-Dokument ist durch die große Anzahl von Seiten sowie durch die Vielzahl von Querverweisen sehr schwer nachzuvollziehen. Die vorgestellte Software führt hier zu einer erheblichen Verbesserung.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L																
2	<b>CALCULATION OF SHORT CIRCUIT CURRENT OF A SYNCHRONOUS MACHINE 690V</b>																										
6	<b>Data of machine</b>					<b>Generator 1</b>																					
8	$P_{rated}$ :	3340 kW	$x_d''$ [%]	18,00%																							
9	$\cos \phi$ :	0,8	$x_d'$ [%]	32,10%																							
10	$S_{rated}$ :	4175 kVA	$x_d$ [%]	252,60%																							
11	$U_{rated}$ :	690 V	$r_a$ [%]																								
12	$I_G$ :	3,49 kA	$T_d''$	19 ms																							
13	fr:	50 Hz	$T_d'$	701 ms																							
14	$R_a$ :	13,75 mOhm	$(T_a) = T_{ac}$	87 ms																							
15	$I_k$ :	10,48 kA (Steady-state short circuit symmetrical current acc. to company data, otherwise 3 times nom. current)																									
18	<b>Impedances of machine</b>																										
20	$R_a$	13,75 mOhm	$X_d''$	20,53 mOhm	$Z_d''$	24,71 mOhm																					
22	$X_d'$	36,61 mOhm	$X_d$	288,05 mOhm	$Z_d'$	39,10 mOhm																					
25	<b>Impedances of cable</b>																										
26	calculated		R	0,00 mOhm		0,00 mOhm																					
27	input		R	mOhm	X	mOhm																					
29	<b>Impedances of short circuit</b>																										
30		R [mOhm]	$X_d''$ [mOhm]	$X_d'$ [mOhm]	$X_d$ [mOhm]																						
32	Generator	13,75	20,53	36,61	288,05																						
33	Cable	0,00	0,00	0,00	0,00																						
35	Total	13,75	20,53	36,61	288,05																						
37	$Z_d''$	24,71 mOhm	$Z_d'$	39,10 mOhm	$Z_d$	288,16 mOhm																					
40	<b>Short circuit current at rated duty (t=0)</b>																										
42		$E''$	480,59 V	$E'$	518,64 V																						
44	$i_k''(I_{AC})$	19,45 kA	$i_k'$	13,26 kA	$i_{DC}$	24,55 kA																					
47	<b>Fitted time constants</b>																										
49	$T_d''$	21,99 ms	$T_d'$	785,82 ms	$T_{DC}$	4,75 ms																					
52	<b>Time dependent short circuit current</b>																										
53		t [ms]	periods	$I_{AC}$ [kA]	$i_{DC}$ [kA]	$i_p$ [kA]																					
54		0,00	0,0	19,45	24,55																						
55		10,00	0,5	17,16	2,99	27,25																					
56		20,00	1,0	15,69	0,36																						
57		30,00	1,5	14,74	0,04																						
58		40,00	2,0	14,13	0,01																						
59		50,00	2,5	13,73	0,00																						
60		60,00	3,0	13,46	0,00																						
65	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%; text-align: center;">SHORT CIRCUIT CALCULATION</td> <td style="width: 30%; text-align: center;">  </td> <td style="width: 20%;">Zg-Nr.</td> <td style="width: 20%; text-align: center;">page</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ers.</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Urspr.</td> <td style="text-align: center;">of</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> </table>											SHORT CIRCUIT CALCULATION		Zg-Nr.	page			Ers.	1			Urspr.	of				1
SHORT CIRCUIT CALCULATION		Zg-Nr.	page																								
		Ers.	1																								
		Urspr.	of																								
			1																								

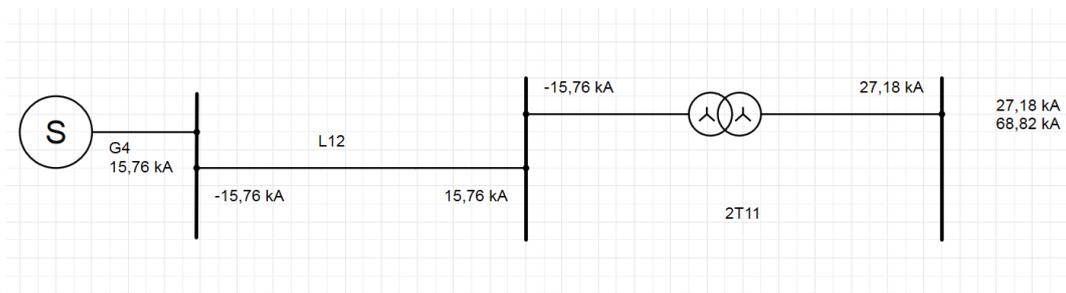
Abbildung 5.2: Excel: Berechnung Generator und Leitung<sup>13</sup>

<sup>13</sup>Bildquelle: [Hafner, 2004]

### 5.2.2 Siemens Sincal

Die von der Firma Siemens erstellte Simulationssoftware für die Kurzschlussberechnung ist für größere Netze ausgelegt.

Um einen Vergleich zwischen den Programmen durchzuführen, wurde das Beispiel aus Abschnitt 5.1 verwendet. Der Simulationsaufbau ergibt sich wie folgt:



**Abbildung 5.3:** Sincal: Generator, Leitung Transformator

Die Berechnung des Aufbaus wurde an der HAW Hamburg im Labor für Antriebstechnik durchgeführt. Die verwendete SINCAL-Hochschulversion basiert nicht auf der IEC Norm, sondern auf der komplexeren VDE Norm.

Knotenergebnisse dreipoliger Kurzschluss			
Ergebnisse			
Knoten	N16		
Netzebene	Netzebene (0,4 kV)		
Treibende Spannung	U <sub>k</sub>	0,440	kV
Schaltverzug	t <sub>s</sub>	0,100	s
Anfangs KS-Wechselstromleistung	S <sub>k</sub> <sup>*</sup>	18,834	MVA
Anfangs KS-Wechselstrom	I <sub>k</sub> <sup>*</sup>	27,184	kA
Winkel Anfangs KS-Wechselstrom	phi I <sub>k</sub> <sup>*</sup>	-82,355	°
Abschaltleistung	S <sub>a</sub>	15,945	MVA
Abschaltstrom	I <sub>a</sub>	23,014	kA
Stoßkurzschlussstrom	i <sub>p</sub>	68,816	kA
Gleichstrom bei Schaltverzug	i <sub>dc</sub>	0,567	kA
Asym. Abschaltstrom	I <sub>asym</sub>	23,021	kA
Minimaler Dauerkurzschlussstrom	I <sub>kmin</sub>	14,481	kA
Anfangswert X/R	X/R I <sub>k</sub> <sup>*</sup>	7,450	1
Impedanz - real	Z <sub>r</sub>	0,001	Ohm
Impedanz - imaginär	Z <sub>i</sub>	0,009	Ohm
Impedanz - absolut	Z <sub>a</sub>	0,009	Ohm
Kurzschlussstromauslastung	I <sub>k</sub> <sup>*</sup> /I <sub>kmax</sub>	0,000	%
Stoßkurzschlussstromauslastung	i <sub>p</sub> /i <sub>pmax</sub>	0,000	%
Kurzschlussleistungsauslastung	S <sub>k</sub> <sup>*</sup> /S <sub>kmax</sub>	0,000	%

**Abbildung 5.4:** Generator, Leitung und ein Transformator die einen Kurzschluss speisen

Wie aus der Rechnung hervor geht, liegt der berechnete Stoßkurzschlussstrom  $i_p$  bei 68,8 kA und der Anfangskurzschlussstrom bei  $I_k$  bei 27,2 kA. Dazu im Vergleich der aus dem Beispiel nach IEC Norm:  $i_p = 61,5$  kA und  $I_k = 21,8$  kA. Die Ergebnisse weichen um 13 % von einander ab. Diese Unterschiede haben mehrere Gründe: zunächst wurde die Berechnung nach VDE Norm berechnet. In der Norm werden beispielsweise Spannungsfaktoren für Niederspannungsanlagen mit einer Toleranz von 10 % angegeben. Wie in dem Einführungskapitel der IEC Norm erwähnt, werden einige Vereinfachungen getroffen, die weitere Abweichungen ausmachen. Die Siemens-Software

arbeitet an dieser Stelle also mit einer höheren Sicherheit, insbesondere bezüglich auf Schwankung der Netzspannung.

Die Software von Siemens wäre als Berechnungsprogramm für Kurzschlussströme ebenfalls anwendbar. Das Siemens-Programm ist aber mit seinen vielen komplexen Einstellmöglichkeiten für die Berechnung der eher kleinen Schiffsnetze zu mächtig. Hinzu kommt der kostenträchtige Erwerb einer Lizenz und die Abhängigkeit von einem fremden Programm, in dass nicht so ohne weiteres eingegriffen werden kann. Daher fiel die Entscheidung auf eine eigene entwickelte Software. In diese lassen sind spezifische neue Umgebungs- und Bauteiländerungen ohne große Umstände implementieren. [EN60909, 2002]

### 5.2.3 Simulation mit Simplorer

Zur weiteren Verifizierung des vorgestellten Programms wurde eine Synchronmaschine in Simplorer simuliert. Simplorer behandelt ein weit komplexeres Modell einer Synchronmaschine als in der IEC Norm beschrieben.

Für die Simulation werden die Herstellerdaten aus dem Beispiel 5.1 verwendet. Die Herstellerdaten werden über die Park-Transformation in Längs- und Querachse geteilt, um sie auf das Modell übertragen zu können. Dabei werden Ströme, Spannungen und Reaktanzen anteilig auf die Achsen transformiert.

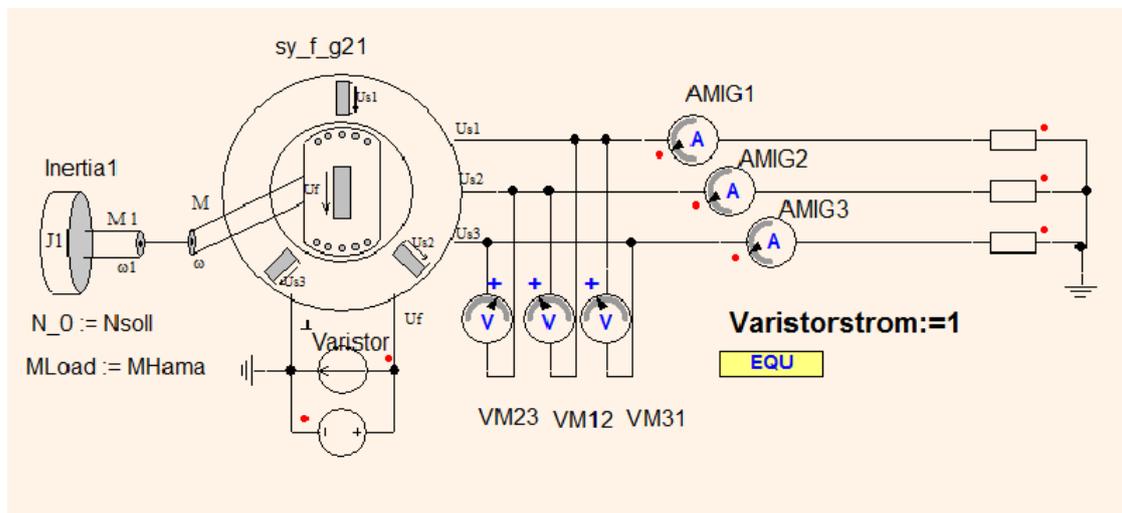
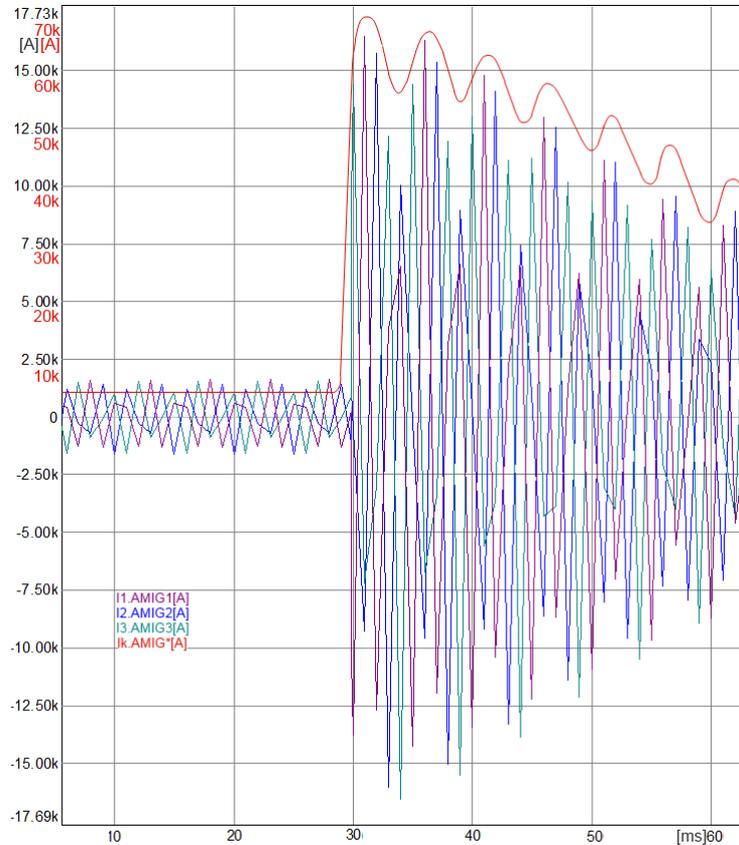


Abbildung 5.5: Simplorermodell einer Synchronmaschine im Kurzschlussfall

Wie auf Abbildung 5.5 dargestellt ist, sind neben der Synchronmaschine noch weitere Regelkreise und mechanische Umsetzungen vorhanden. Diese wurden für die Simulation nicht eingebunden bzw. auf Standardeinstellungen gesetzt. Der Aufbau in Simplorer ist durch die Umwandlung der Maschinendaten, durch die Beachtung von

magnetischen Verlusten sowie durch das Einbinden von Sättigungseffekten beliebig komplex. Dies macht die Analyse der Ergebnisse nur schwer nachvollziehbar.



**Abbildung 5.6:** Simulationsergebnisse aus Simplorer

Als Simulationsergebnis ist in [Abbildung 5.6](#) das Verhalten der Ströme in den Außenleitern sowie der Gesamtkurzschlussstrom, resultierend aus den Einzelströmen und dem zeitlichen Verhalten, abgebildet. Der Kurzschlussstrom steigt auf ca.  $68[kA]$  und fällt dann über die Zeit ab. Die Ergebnisse fallen ähnlich wie in den anderen Berechnungsprogrammen aus. Die Berechnung des Kurzschlussstroms kann über das im Anhang vorhandene Simplorer-Modell eingesehen werden. Diese Simulation verdeutlicht die Komplexität der Synchronmaschine, die in der Norm doch stark vereinfacht wurde.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorthesis wurde eine Software zur Kurzschluss-Berechnung erstellt und in eine bereits bestehende SPS-Oberfläche integriert.

Die Berechnungs-Algorithmen des zuvor genutzten Excel-basierten Tools wurden überarbeitet, erweitert und in die Objekt-orientierte Programmiersprache Delphi übertragen. Die benötigten Bauteile wurden implementiert, Eingabemasken wurden eingerichtet. Das Festlegen von Berechnungsreihenfolgen und das Entwickeln einer Simulationsalgorithmus bestimmt die vorgestellte Berechnung. Dabei wird auf die Berechnungstheorien aus der Norm IEC 61363-1, in der die mathematischen Grundlagen erklärt werden, Bezug genommen. Die Berechnungsergebnisse werden in Ausgabemasken präsentiert und es wird die Möglichkeit geschaffen, das Projekt nach Microsoft Excel zu exportieren und zu dokumentieren.

Die Arbeit ist bis zu diesem Stand in sich geschlossen Sie erfüllt alle Leistungen früher verwendeten Tools und geht darüber hinaus. Ein möglicher nächster Schritt wäre, die Problematik der unidirektionalen Bauteile zu lösen. Dies würde eine massiven Eingriff in die Simulationseigenschaften der SPS bedeuten. Die Überlegung hierfür wäre, eine komplett eigenständiges Simulationsmodus in die SPS zu integrieren.

Weiterführend könnte die Möglichkeit geschaffen werden, ein- und zweipolige Kurzschlüsse zu simulieren. Dies würde das Einführen von symmetrischen Komponenten und eine Berechnung von Mit-, Gegen-, und Nullsystem erfordern. Als ein eher kleinerer weiterführender Schritt käme das Hinzufügen von weiteren Umrichtertypen, die nach spezifischen Herstellerangaben programmiert werden würden, in Frage. Die Transformatoren könnten noch weiter spezifiziert werden, zum Beispiel über das Hinzufügen einer Dreiwicklungstransformators.

# Literaturverzeichnis

- DIN 43671:1975-12. *Stromschienen aus Kupfer; Bemessung für Dauerstrom*. Deutsches Institut für Normung, 1975.
- Kurt Bonfert. *Betriebsverhalten der Synchronmaschine*. Springer-Verlag Berlin, 1962.
- Roland Calvas, Benoit De Metz Noblat, André Ducluzaux, and Georges Thmasset. *Technisches Heft Nr.158: Berechnung von Kurzschlußströmen*. SchneiderElectric, 1992. URL <http://www.schneider-electric.ch>.
- Walter Doberenz and Thomas Kowalski. *Borland Delphi 5. Kochbuch*. Hanser Fachbuch, 2000. ISBN 3446213651.
- Walter Doberenz and Thomas Kowalski. *Borland Delphi 7. Grundlagen und Profiwissen*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2002. ISBN 3446223169.
- EN60909. Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, 2002.
- energie.de. Arten der kurzschlüsse. abgerufen am 12.1.2015, 2014. URL [http://www.energie.de/lexika/energielexikon/details/arten\\_der\\_kurzschlusse\\_100003610/](http://www.energie.de/lexika/energielexikon/details/arten_der_kurzschlusse_100003610/).
- Merlin Gerin. *Leistungsschalter und Leistungstrennschalter für Niederspannungsnetze*. Schneider Electrics, 2006.
- Rüdiger Hafner. *Short Circuit Calculation*. SAM Electronics GmbH, 2004.
- Edmund Handschin. *Elektrische Energieübertragungssysteme 2. Auflage*. Hüthing Heidelberg, 1983.
- Klaus Heuck, Klaus-Dieter Dettmann, and Detlef Schulz. *Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis (German Edition)*. Vieweg+Teubner Verlag, 8., überarb. u. akt. Aufl. 2010 edition, 9 2010. ISBN 9783834807366.
- IEC61363-1. *Electrical installations of ships and mobile and fixed offshore units*. International Electrotechnical Commission, 1998.

- 
- Bernd R. Oswald. *Netzberechnung, Bd.1, Berechnung stationärer und quasistationärer Betriebszustände in Elektroenergieversorgungsnetzen*. Vde-Verlag, 1992. ISBN 9783800717187.
- PowerFactory. *Short-Circuit Method IEC 61363 Technical Reference*. DigSILENT GmbH, 2009.
- Richard Roeper. *Kurzschlußströme in Drehstromnetzen*. Siemens Aktiengesellschaft, 1984.
- Jürgen Schlabbach. *Kurzschlussstromberechnung: Anlagentechnik für elektrische Verteilungsnetze*. EW Medien und Kongresse, 2 edition, 7 2014. ISBN 9783802211232.
- Adolf J. Schwab. *Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie (German Edition)*. Springer, 1 edition, 8 2006. ISBN 9783540296645.

# Variablenverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
$R_{aG}$	$\Omega$	Statischer Widerstand Generator (absoluter)
$r_{aG}$	%	Statischer Widerstand Generator (bezogener Wert)
$U_{nG}$	V	Nennspannung Generator
$S_{nG}$	VA	Scheinleistung Generator
$X_d$	$\Omega$	synchrone Reaktanz
$X'_d$	$\Omega$	transiente Reaktanz
$X''_d$	$\Omega$	subtransiente Reaktanz
$x_d$	%	synchrone Reaktanz (bezogener Wert)
$x'_d$	%	Transiente Reaktanz (bezogener Wert)
$x''_d$	%	Subtransiente Reaktanz (bezogener Wert)
$Z_d$	$\Omega$	Stationäre Impedanz
$Z'_d$	$\Omega$	Transiente Impedanz
$Z''_d$	$\Omega$	Subtransiente Impedanz
$E'_q$	V	Transiente Spannung
$E''_q$	V	Subtransiente Spannung
$I''_k$	A	Subtransienter Kurzschlussstrom
$I'_k$	A	Transienter Kurzschlussstrom
$I_k$	A	Dauerkurzschlussstrom
$I_n$	A	Nennstrom

---

$T_{DCG}$	ms	Gleichspannungszeitkonstante Generator
$T'_d$	ms	Transiente Zeitkonstante Generator
$T''_d$	ms	Subtransiente Zeitkonstante Generator
$i_{dcG}$	A	Abklingender Gleichstromanteil des Kurzschlusses
$i_{acG}$	A	Abklingender Wechselstromanteil des Kurzschlusses
$i_{ip}$	A	Stoßkurzschlussstrom
$I_{nG}$	A	Nennstrom Generator
$I_{nM}$	A	Nennstrom Motor
$P_{nM}$	W	Motor Leistung
$U_{nM}$	V	Nennspannung Motor
$Z_{Mmot}$	$\Omega$	Motorimpedanz
$R_S$	$\Omega$	Statorwiderstand Motor
$R_R$	$\Omega$	Rotorwiderstand Motor
$R_M$	$\Omega$	Gesamtwiderstand Motor
$X''_M$	$\Omega$	Subtransiente Reaktanz in Längsrichtung Motor
$T''_M$	ms	Subtransiente Zeitkonstante Motor
$T_{DCM}$	ms	Gleichspannungszeitkonstante Motor
$E''_M$	V	Subtransiente Spannung Motor
$I''_M$	A	Subtransiente Strom Motor
$r_{Rotor}$	$\Omega$	Rotorwiderstand Motor (bezogener Wert)
$r_{Stator}$	$\Omega$	Statorwiderstand Motor (bezogener Wert)
$i_{acM}$	A	Abklingender Wechselstromanteil des Kurzschlusses Motor
$i_{dcM}$	A	Abklingender Gleichstromanteil des Kurzschlusses Motor
$\ddot{u}$		Übersetzungsverhältnis Transformator
$Z_T$	$\Omega$	Impedanz Transformator

---

$R_T$	$\Omega$	Widerstand Transformator
$X_T$	$\Omega$	Reaktanz Transformator
$U_{nT}$	V	Ober- oder Unterspannungsseite Transformator
$u_k$	%	Bemessungswert Kurzschlussspannung Transformator in %
$u_r$	%	Bemessungswert des Transformator in %
$S_{nT}$	VA	Scheinleistung Transformator
$I_{nT}$	A	Nennstrom Transformator
$P_{knT}$	W	Wicklungsverluste bei Bemessungsstrom
$U_{nU}$	V	Nennspannung Umrichter
$I_{nU}$	A	Nennstrom Umrichter
$I_{kU}$	V	Kurzschlussstrom Umrichter
*		Ersatzgrößen/Zusammengefasste Größen

# Glossar

<b>Delphi</b>	Objektorientierte Programmiersprache
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>EMK</b>	Elektromagnetische Kraft
<b>Excel</b>	Software für Tabellenkalkulation
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission
<b>Record</b>	Datenstruktur
<b>Simplorer</b>	Simulationssoftware für Elektrische- und Mechanischesystem
<b>Sincal</b>	Kurzschluss-Berechnungssoftware von Siemens
<b>SPC</b>	Engl.: stored program control
<b>SPS</b>	Speicherprogrammierbare Steuerung
<b>VB</b>	Visual Basics
<b>VDE</b>	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

# Inhalt der CD

Die CD enthält sämtliche Datenblätter, Quellcode und Quellen.

<b>Pfad</b>	<b>Beschreibung</b>
Datenblätter/	Alle verwendeten Datenblätter
Delphi 5/	Gesamter Quellcode des Projekts
Literatur/	Alle PDF-Dateien, die im Literaturverzeichnis angegeben sind
Bachelorthesis.pdf	Bachelorthesis in PDF-Form
ExcelExport.xlsm	VB und Excel-Programm
SimplorerSynchronmaschine.ssh	Simplorermodel einer Synchronmaschine

Die CD ist bei dem Erst- sowie Zweitprüfer einzusehen.

# Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 18. März 2015

---

Ort, Datum

---

Unterschrift