

# Grundlegende Untersuchungen zum transienten Verhalten von dezentralen Energieerzeugern im Niederspannungsnetz

Diplomarbeit



Institut für Elektrische Anlagen  
TU Graz

Autor:  
Jürgen Plesch

Betreuer:  
Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert  
DI Maria Aigner

Institutsvorstand: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I  
Telefon: (+43 316) 873 - 7551  
Telefax: (+43 316) 873 - 7553  
<http://www.ifea.tugraz.at>  
<http://www.tugraz.at>



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 12. Juli 2010

## Kurzfassung

- Titel:** Grundlegende Untersuchungen zum transienten Verhalten von dezentralen Energieerzeugern im Niederspannungsnetz
- Schlüsselwörter:** Niederspannungsnetz, dezentrale Energieversorgung, Parallel- und Netzinselbetrieb, Kurzschlussvorgänge, dynamisches Verhalten

In dieser Arbeit wird das Verhalten von dezentralen Energieerzeugungsanlagen in Niederspannungsnetzen, speziell das von Synchronmaschinen bei Parallel- und Netzinselbetrieb, analysiert. Ausgangspunkt der Untersuchungen ist die Parallelspeisung (übergeordnetes Verteilnetz - Last - dezentrale Energieerzeugungsanlage) passiver elektrischer Verbrauchergruppen. Unter der Annahme eines stationären Betriebspunktes, wird bei Auftreten eines Kurzschlusses das dynamische Verhalten der Maschine überwacht und analysiert. Abhängig von der Differenz zwischen der mechanisch über die Welle eingespeisten Leistung und der abgegebenen elektrischen Leistung ins Netz, erfolgt eine Beschleunigung oder Verzögerung des Polrades. Während Netzsicherungen vorhandene Fehlerströme aufgrund der geringen Kurzschlussimpedanz schnell, sicher und selektiv in der vorgegebenen Zeit erkennen und abschalten, kann jedoch der Fall auftreten, dass das Schutzorgan der Synchronmaschine nur eingeschränkt auf den Fehler reagiert. Da Personensicherheit nur mehr eingeschränkt gewährleistet werden kann, ist es mit dem derzeitigen Stand der Technik notwendig, Synchronmaschinen schnell und sicher zu entlasten und vom Netz zu trennen. Für die Untersuchung der Stabilität werden verschiedene Simulationen durchgeführt. Um die erhaltenen Simulationsergebnisse kontrollieren zu können, wird ein Messtechnikkonzept für einen realen Laborversuch entwickelt. Anhand des Versuchsaufbaus konnten die gewonnenen Simulationsergebnisse bestätigt werden.

## Abstract

Title: Basic analysis of the transient behaviour of decentralised power generation systems in low voltage grids

Keywords: low voltage grid, decentralised energy supply, parallel and isolated operation, short circuit process, dynamic behaviour

In this work the behaviour of decentralised power generation systems in low voltage grids, especially the behaviour of the synchronous machine in parallel and in isolated operation, is analysed. The starting point of the studies is the parallel supply of electric consumer groups. Assuming a stationary operating point, the dynamic behaviour of synchronous machine is analysed in case of an insulation fault. Depending on the difference between the mechanical power over the shaft and the electrical power supplied into the grid, the rotor of the machine accelerates or decelerates. Main protection devices (fuses) are speaking sufficient, but it can happen that the protection device of the synchronous machine is not or only limited responding to the fault current. In this case personal safety can only be ensured limited therefore it is necessary to disconnect the synchronous machine quickly from the grid. For studying the behaviour of the synchronous machine different simulations have been executed. To verify the obtained simulation results a measurement concept for a laboratory experiment has been developed. On the basis of the laboratory test setup the obtained simulation results have be confirmed.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>	<b>13</b>
2.1	Ziel . . . . .	13
2.2	Methode . . . . .	13
2.3	Ergebnisse . . . . .	13
2.4	Schlussfolgerungen . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Einleitung</b>	<b>14</b>
3.1	Einseitige Speisung der Last . . . . .	14
3.2	Zweiseitige Speisung der Last . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Beschreibung des Modellnetzes</b>	<b>17</b>
4.1	Modellaufbau . . . . .	17
4.2	Simulationsmethode . . . . .	18
4.3	Niederspannungsnetz - Block 1 . . . . .	19
4.4	Leitungsmodell - Block 2 . . . . .	19
4.5	Dezentrale Energieerzeugungsanlage - Block 3 . . . . .	20
4.6	Last - Block 4 . . . . .	21
4.7	Reaktionszeit der Überstromschutzelemente . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Allgemeines - Analytische Berechnungen</b>	<b>23</b>
5.1	Berechnung der Drehzahl . . . . .	23
5.1.1	Berechnung der Anlaufzeitkonstante . . . . .	24
5.1.2	Drehzahlberechnung unter Vernachlässigung der Dämpfung D . . . . .	24
5.1.3	Drehzahlberechnung unter Berücksichtigung der Dämpfung D . . . . .	26
5.2	Regler für die Erregerspannung . . . . .	26
5.2.1	Modellierung des Reglers . . . . .	27
5.3	Berechnung der Fehlerströme mit symmetrischen Komponenten . . . . .	28

5.3.1	Allgemeines . . . . .	28
5.3.2	Dreipoliger Kurzschluss - Allgemeines . . . . .	29
5.4	Kurzschlussvorgang von Synchrongeneratoren . . . . .	30
5.4.1	Theoretische Grundlagen . . . . .	30
5.4.2	Gesamtkurzschlussstrom . . . . .	30
5.4.3	Subtransienter Zeitbereich . . . . .	32
5.4.4	Transienter Zeitbereich . . . . .	33
5.4.5	Stationärer Zeitbereich . . . . .	33
5.5	Berechnung der Generatorleistung . . . . .	34
<b>6</b>	<b>Berechnung und Simulationen relevanter Aufgabenstellungen</b>	<b>35</b>
6.1	Trennung der unbelasteten Synchronmaschine vom Netz . . . . .	35
6.1.1	Aufgabenstellung . . . . .	35
6.1.2	Simulation . . . . .	36
6.2	Trennung der belasteten Synchronmaschine vom Netz . . . . .	37
6.2.1	Aufgabenstellung . . . . .	37
6.2.2	Berechnung . . . . .	37
6.2.3	Simulation . . . . .	39
6.2.4	Vergleich . . . . .	44
6.3	Änderung des Belastungszustandes . . . . .	45
6.3.1	Aufgabenstellung . . . . .	45
6.3.2	Simulation . . . . .	46
6.3.3	Ergebnis . . . . .	47
6.4	Überstromschutzabschaltung der Last . . . . .	48
6.4.1	Aufgabenstellung . . . . .	48
6.4.2	Simulation . . . . .	48
6.4.3	Ergebnis . . . . .	49
6.5	Kurzschluss auf der Lastseite . . . . .	50
6.5.1	Aufgabenstellung . . . . .	50
6.5.2	Berechnung . . . . .	51
6.5.2.1	Berechnung der Polradspannungen . . . . .	51
6.5.2.2	Berechnung der Kurzschlussströme . . . . .	52
6.5.2.3	Berechnung der umgesetzten Leistung . . . . .	53
6.5.2.4	Berechnung der verbleibenden Restspannung . . . . .	54
6.5.2.5	Berechnung der Drehzahl infolge des Fehlers . . . . .	54
6.5.3	Simulation . . . . .	55

6.5.4	Vergleich . . . . .	58
6.6	Zusammenfassung . . . . .	60
6.6.1	Verwendung eines Drehzahlwächters . . . . .	60
6.6.2	Zuschalten von Wirkleistungsverbrauchern . . . . .	60
6.6.3	Reduktion der Einspeiseleistung . . . . .	61
<b>7</b>	<b>Labormesskonzept und -aufbau</b>	<b>62</b>
7.1	Synchronmaschine . . . . .	64
7.1.1	Ermittlung der elektrischen Größen . . . . .	64
7.1.2	Ermittlung der mechanischen Größen . . . . .	64
7.1.3	Berechnungen an der Synchronmaschine . . . . .	65
7.1.3.1	Kurzschlussströme . . . . .	65
7.1.3.2	Abschätzung der Anlaufzeitkonstante . . . . .	65
7.2	Transformator . . . . .	67
7.2.1	Schaltgruppe des Transformators . . . . .	68
7.3	Leitungsimpedanzen . . . . .	70
7.3.1	Synchronmaschinenseitiger Fehlerstromzweig . . . . .	70
7.3.2	Transformatorseitiger Fehlerstromzweig . . . . .	72
7.4	Überstromschutzelement . . . . .	73
7.5	Fehlerauswahlschalter . . . . .	74
7.6	Messgrößen . . . . .	75
7.7	Zusammenfassung - Messaufbau . . . . .	76
7.8	Abschätzung der Fehlerströme . . . . .	76
<b>8</b>	<b>Auswertung des Messversuchs</b>	<b>80</b>
8.1	Bedienung für Hochfahren und Zuschalten . . . . .	81
8.1.1	Synchronisierbedingungen . . . . .	82
8.2	Zuschalten und Kurzschluss des Transformators . . . . .	84
8.3	Versuche . . . . .	86
8.3.1	Filterung der Signale . . . . .	86
8.3.2	Synchronmaschine mit Drehzahlvorgabe (Inselnetzbetrieb) . . . . .	87
8.3.3	Synchronisierung ans Netz . . . . .	88
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>92</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>94</b>



---

<b>11 Anhang</b>	<b>96</b>
11.1 Stückliste . . . . .	96
11.2 Bohr- und Schaltpläne . . . . .	96



# 1 Abkürzungsverzeichnis

$\Delta\omega$	.....	Drehzahlabweichung
$\omega_n$	.....	Nenndrehzahl
$\omega_{m,n}$	.....	Mechanische Nenndrehzahl
$\omega_m$	.....	Mechanische Kreisfrequenz $2\pi n$
$\omega_s$	.....	Synchrone Drehzahl
$\omega_{el}$	.....	Drehzahl infolge eines Leistungsungleichgewichts
$\omega_{maxoD}$	.....	Maximale Drehzahl mit Dämpfung
$\omega_{maxoD}$	.....	Maximale Drehzahl ohne Dämpfung
$\varphi$	.....	Winkel der Last
$\vartheta$	.....	Polradwinkel
a	.....	Phasenverschiebung
$\cos\varphi$	.....	Leistungsfaktor - Netzmodell
D	.....	Dämpfungskonstante
DEA	.....	Dezentrale Energieerzeugungsanlage
E	.....	Polradspannung
E'	.....	Transiente Polradspannung
E''	.....	Subtransiente Polradspannung
$f_{diff}$	.....	Differenzfrequenz zwischen zwei Spannungssignalen
$f_M$	.....	Nennfrequenz - Netzmodell
H	.....	Trägheitskonstante
$I^1$	.....	Strom des Mitsystems
$I_1$	.....	Strangstrom der Synchronmaschine
$i_d$	.....	Strom in d - Richtung
$I_K$	.....	Stationärer Kurzschlussstrom
$I_K'$	.....	Transienter Kurzschlussstrom
$i_q$	.....	Strom in q - Richtung
$I_{DC}$	.....	Zeitliche Verlauf des Kurzschlussgleichstromes
$I_f$	.....	Fehlerstrom

$I_{\text{ges}}$	.....	Gesamtstrom von Netz und Synchronmaschine
$I_{\text{kN}}$	.....	Netzseitige Kurzschlussstrom
$I_{\text{k}}$	.....	Zeitliche Verlauf des Kurzschlusswechselstromes
$I_{\text{N}}$	.....	Nennstrom - Netzmodell
$I_{\text{pr}}$	.....	Transformatorstrom der Primärseite
$I_{\text{sek}}$	.....	Transformatorstrom der Sekundärseite
$I_{\text{K}}''$	.....	Subtransienter Kurzschlussstrom
$J$	.....	Trägheitsmoment
$J_{\text{ges}}$	.....	Gesamtträgheitsmoment der Synchronmaschine - Netzmodell
$L_{\text{d}}$	.....	Längsinduktivität
$L_{\text{q}}$	.....	Querinduktivität
$m_{\text{AM}}$	.....	Masse der Antriebsmaschine
$m_{\text{ges}}$	.....	Gesamtmasse
$m_{\text{SM}}$	.....	Masse der Synchronmaschine
$M_{\text{E}}$	.....	Antriebsmoment des Generators (elektrisch)
$M_{\text{T}}$	.....	Antriebsmoment der Turbine (mechanisch)
$P$	.....	Leistung - Netzmodell
$p$	.....	Polpaarzahl
$P(t)$	.....	Leistung an der Synchronmaschine
$P_{\text{Emax}}$	.....	Maximal übertragbare Leistung
$P_{\text{E}}$	.....	Wirkleistung der Synchronmaschine
$P_{\text{E}}(t)$	.....	Elektrische Leistung
$P_{\text{M}}(t)$	.....	Mechanische Leistung
$p_{\text{Ph}}(t)$	.....	Leistung in einer Phase
$P_{\text{verbrauch}}$	.....	Umgesetzte Leistung im Fehlerfall
$R$	.....	Ständerwiderstand der Synchronmaschine
$R(s)$	.....	Regler für die Erregerspannung der Synchronmaschine
$r_{\text{AM}}$	.....	Radius des Rotors
$r_{\text{SM}}$	.....	Radius des Rotors
$R_1$	.....	Ohmscher Widerstand der Primärseite
$R_1$	.....	Strombegrenzungswiderstand - Netzmodell
$R_2'$	.....	Ohmscher Widerstand der Sekundärseite - bezogen auf die Primärseite
$R_2$	.....	Strombegrenzungswiderstand - Netzmodell
$R_{\text{Fehler}}$	.....	Widerstand der Fehlerquelle
$R_{\text{FE}}$	.....	Eisenwiderstand des Transformators

$R_L$ .....	Ohmscher Widerstand der Last
$S_N$ .....	Nennscheinleistung
$S_{N1}$ .....	Sicherungsautomat netzseitig
$S_{N2}$ .....	Sicherungsautomat netzseitig
$S_{N3}$ .....	Sicherungsautomat netzseitig
$S_{S1}$ .....	Sicherungsautomat DEA - seitig
$t_{diff}$ .....	Periodendauer der Schwebung
$T_{DN'}$ .....	Transiente Zeitkonstant
$T_{DN''}$ .....	Subtransiente Zeitkonstant
$T_{AN}$ .....	Zeitkonstant des abklingenden Gleichstromes
$T_J$ .....	Anlaufzeitkonstante
$T_N$ .....	Nachstellzeit des PI - Reglers
$U$ .....	Klemmenspannung der Synchronmaschine
$U_{L1}$ .....	Leiter - Erde Spannung der Synchronmaschine
$U_{0,1,2}$ .....	Spannung im Nullsystem, Mitsystem und Gegensystem
$u_d$ .....	Spannung in d - Richtung
$u_k$ .....	Kurzschlussspannung des Transformators
$U_{L1,2,3}$ .....	Spannung der Phase 1,2 und 3
$U_N$ .....	Nennspannung - Synchronmaschine und Netzmodell
$U_{ph}$ .....	Phase-Erde Spannung
$u_q$ .....	Spannung in q - Richtung
$V$ .....	Verstärkung des PI - Reglers
$v$ .....	Geschwindigkeit
$W_{kin}$ .....	Kinetische Energie
$X_{\sigma 1}$ .....	Streureaktanz der Primärseite
$X_{\sigma 2}$ .....	Streureaktanz der Sekundärseite - bezogen auf die Primärseite
$x_d$ .....	Reaktanz in d - Richtung
$x_q$ .....	Reaktanz in q - Richtung
$x_{(p.u.)}$ .....	Auf per Unit bezogene Reaktanz
$X_d$ .....	Stationäre Reaktanz der Synchronmaschine
$X_d'$ .....	Transiente Reaktanz der Synchronmaschine
$X_d''$ .....	Subtransiente Reaktanz der Synchronmaschine
$X_H$ .....	Hauptreaktanz des Transformators
$X_L$ .....	Induktiver Widerstand der Last
$Z_1$ .....	Impedanz des Mitsystems

---

$Z_f$ .....	Impedanz der Fehlerstelle
$Z_{\text{Fehler}}$ .....	Fehlerimpedanz
$Z_{\text{ges}}$ .....	Gesamtimpedanz des Netzes von der Quelle bis zur Last
$Z_K''$ .....	Kurzschlussimpedanz des Netzes
$Z_L$ .....	Impedanz der Last
$U_L^1$ .....	Phasenspannung im Mitsystem

## 2 Kurzbeschreibung

### 2.1 Ziel

Anhand verschiedener Simulationen soll das Verhalten der Synchronmaschine im Fehlerfall (dreipoliger Kurzschluss) untersucht werden. Dabei wird das dynamische Verhalten als Reaktion auf den Fehlerstrom sowie der Auslenkung aus dem eingestellten Betriebspunkt analysiert.

### 2.2 Methode

Für die Untersuchung werden Simulationen in *Matlab/Simulink*® durchgeführt. Zusätzlich werden vereinfachte Annahmen getroffen, um mit diesen Annahmen das Verhalten der Synchronmaschine analytisch abschätzen zu können. Durch den Vergleich zwischen Simulation und Berechnung, kann gezeigt werden, dass die vereinfachten Formeln realistische Ergebnisse liefern.

### 2.3 Ergebnisse

Aus den Simulationen geht hervor, dass es nach Fehlerklärung passieren kann, dass eine Neusynchronisierung fehlschlagen kann. In diesem Fall ist eine schnelle Entlastung der Maschine notwendig, um auftretende mechanische Schäden zu vermeiden.

### 2.4 Schlussfolgerungen

Speisen Synchronmaschinen ins Niederspannungsnetz ein, so ist es wichtig, diese infolge eines Fehlers schnell und sicher vom Netz zu trennen. Erfolgt keine Trennung vom Netz, kann es passieren, dass die Speisung auf den Fehler nicht unterbrochen wird. Daher sollten die netz- sowie DEA-seitigen Schutzelemente den Fehlerstrom sicher abschalten.

## 3 Einleitung

Durch den zunehmenden Anstieg von dezentralen Energieerzeugungsanlagen (DEA) ist die Kenntnis vom Betriebsverhalten von besonderer Bedeutung, wobei zwischen dem stationären und dynamischen Verhalten unterschieden werden muss. Bei den folgenden Betrachtungen spielt das stationäre Verhalten eine untergeordnete Rolle. Anhand verschiedener Simulationen soll die Stabilität einer dezentralen Energieerzeugungsanlage, speziell am Beispiel einer Synchronmaschine, im Niederspannungsnetz nachgewiesen werden. Für die Untersuchungen wird ein Simulationsmodell in der Simulationsumgebung *Matlab/Simulink*<sup>®</sup>, wie in Abbildung 3.1 schematisch ersichtlich, aufgebaut.

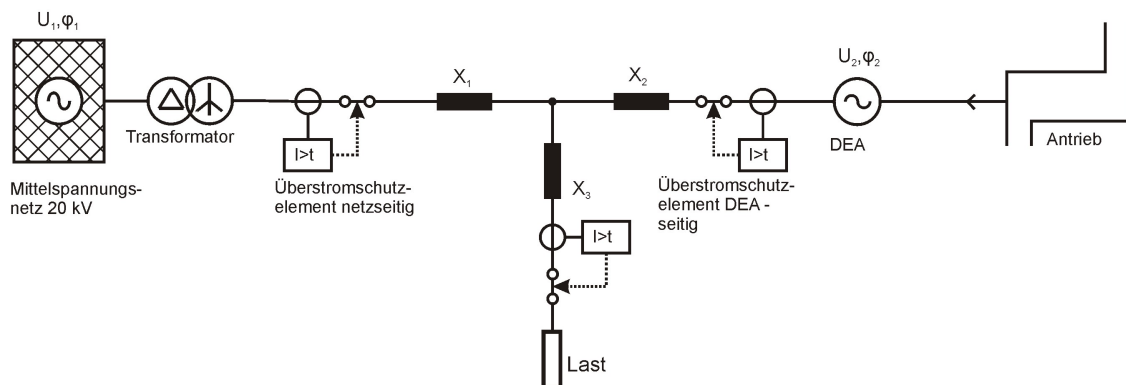


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Simulationsaufbaus

### 3.1 Einseitige Speisung der Last

Ohne Einspeisung aus dezentralen Energieerzeugungseinheiten ist der Energiefluss von der Quelle bis zur Senke genau definiert - siehe Abbildung 3.2. Treten auf der Lastseite Kurzschlüsse auf, werden diese vom übergeordneten Schutzorgan erkannt und sicher abgeschaltet, sodass kein Schaden an Personen und / oder Betriebsmitteln entsteht. Die auftretenden Fehlerströme sind von den Kurzschlussimpedanzen  $Z_K''$  abhängig. Nach Fehlerklärung wird das Netz wieder zugeschaltet, die Last wird mit elektrischer Energie versorgt.

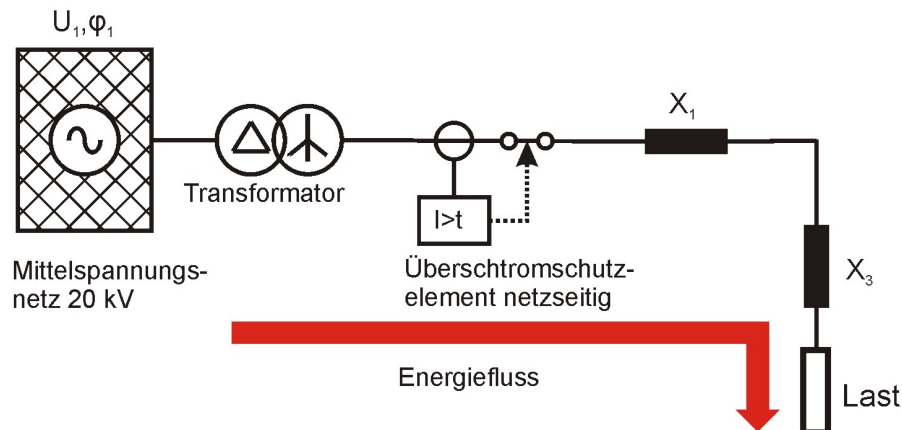


Abbildung 3.2: Einseitige Speisung der Last

### 3.2 Zweiseitige Speisung der Last

Durch die Erweiterung des Netzes mit einer DEA (Abbildung 3.3) stellt sich eine neue Aufteilung des Last- und Energieflusses ein.

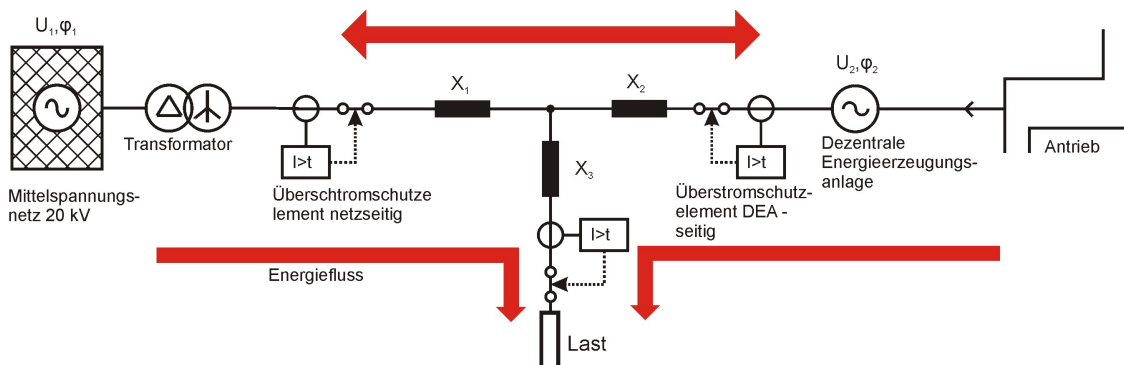


Abbildung 3.3: Zweiseitige Speisung der Last

Die Energie für die Last wird nicht mehr vom Netz alleine bereitgestellt, sondern die DEA liefert auch ihren Beitrag zur Energiedeckung. Der dezentrale Energieerzeuger liefert einerseits elektrische Energie für die Versorgung der Lasten und andererseits kann eine Einspeisung ins übergeordnete Verteilnetz bestehen. Betrachtet man die zweiseitige Speisung der Last, ergibt sich eine neue Betrachtung der Fehlerverlaufs unter Berücksichtigung der Schutzeinrichtungen. Vorausgesetzt wird, dass Unter- bzw. Überspannungsschutz sowie Unter- bzw. Überfrequenzschutz nicht eingreifen (Entkoppelungsschutz). Bei der Synchronmaschine richtet sich der Fehlerstrom nach den Synchronreaktanzen  $X_d$ ,  $X_d'$  und  $X_d''$ , und liegt im stationären Fall betragsmäßig in der Nähe Nennstromes. Somit ist im stationären Fall eine Unterscheidung zwischen Fehler- und Nennstrom

schwierig. Es kann passieren, dass das Überstromschutzelement der DEA aufgrund des geringen Fehlerstromes, abhängig von der Kurzschlussimpedanz der DEA, nicht auslöst und somit weiter auf den Fehler speist. In diesem Fall ist ein Schaden an Personen und / oder Betriebsmitteln nicht mehr auszuschließen. Damit eine sichere Abschaltung erfolgen kann, ist zu gewährleisten, dass das Schutzorgan der DEA genügend Informationen über den Netzzustand zur Verfügung gestellt wird.

Nach Trennung vom speisenden Netz, fehlt der Synchronmaschine die "elektrische Feder" und sie beginnt je nach Differenz zwischen gelieferter und eingespeister Leistung zu beschleunigen oder zu bremsen. Durch die veränderte Belastung stellt sich ein neuer Winkel zwischen der Klemmenspannung  $U$  und der Polradspannung  $E$  ein. Erfolgt eine "Netzzuschaltung" ohne Synchronisierereinrichtung durch die wiederkehrende Spannung, ist es möglich, dass die Synchronmaschine in Phasenopposition zum Netz steht. So kann es sogar zu mechanischen Schäden an der Synchronmaschine kommen. Instabilitäten beim Parallelfahren von Energieversorgen wird in der Literatur als Schlupfvorgang bezeichnet.



## 4 Beschreibung des Modellnetzes

### 4.1 Modellaufbau

Für die Simulationen wird das Modell aus Abbildung 3.1 vereinfacht aufgebaut. Folgende Vereinfachungen werden getroffen:

- Der Transformator wird vernachlässigt. In den Simulationen wird nur die 400 V Ebene betrachtet.
- Es erfolgt keine Nachbildung einer Niederspannungsfreileitung, bei welcher der ohmsche Anteil gegenüber dem induktiven dominant ist, sondern der ohmsche Anteil wird vernachlässigt.
- Die Last wird als ohmsch - induktiver Verbraucher nachgebildet.
- Der Ständerwiderstand der verwendeten Synchronmaschine wird Null gesetzt

Durch die getroffenen Vernachlässigungen wird ein schlechteres Verhalten simuliert als es tatsächlich auftritt. Damit keine eingespeiste Wirkleistung verbraucht wird, werden alle Wirkleistungsverbraucher vernachlässigt. Abbildung 4.1 zeigt den tatsächlichen Messaufbau, der in der Simulationen verwendet wurde.

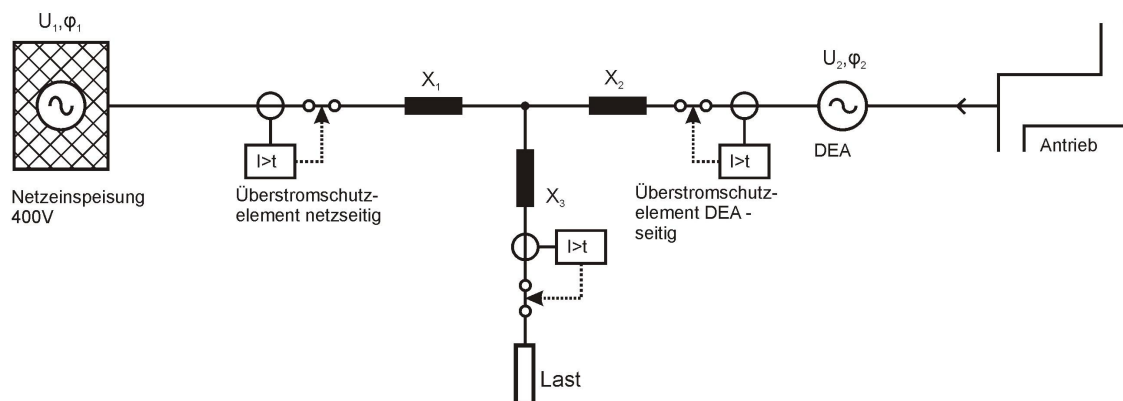


Abbildung 4.1: Tatsächlicher Messaufbau

Für die Simulation werden die zusammengehörigen Komponenten zu Systemen zusammengefasst. Der Koppelplan für *Matlab/Simulink*® kann aus Abbildung 4.2 entnommen werden.

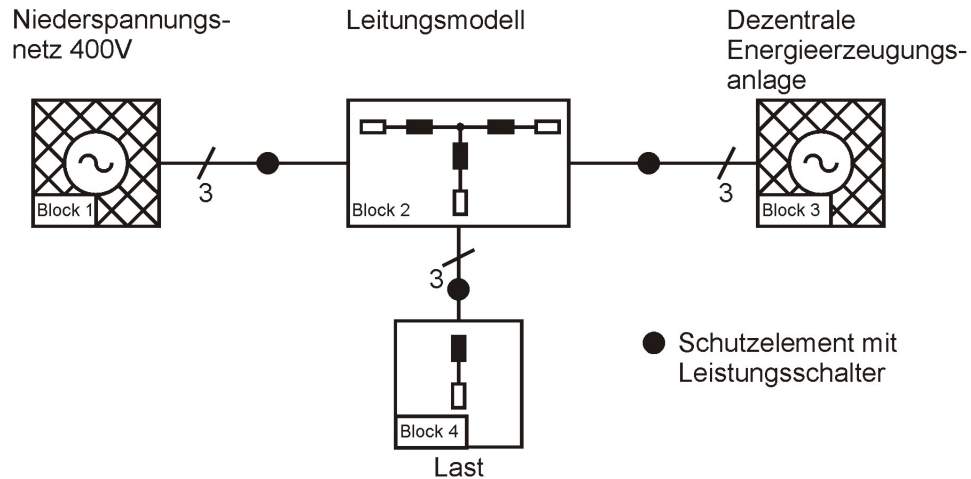


Abbildung 4.2: Koppelplan für die Simulation

Zur Erklärung des Koppelplans wird auf die einzelnen Komponenten eingegangen sowie die getroffene Parametereinstellung angegeben.

## 4.2 Simulationsmethode

Für die Simulationen in *Matlab/Simulink*® wird die Methode "Phasors" verwendet. Als Nennfrequenz wird dieser Methode die 50-Hz Netzfrequenz zugrunde gelegt. Beim Starten der Simulation werden die Impedanzen sowie die Synchronmaschine auf die Nennfrequenz berechnet. Erfolgt eine Abweichung der Drehzahl der Maschine, weicht die Frequenz von den 50-Hz ab. Im verwendeten Synchronmaschinenmodell wird die ändernde Drehzahl bzw. Frequenz berücksichtigt. Die Impedanz bleibt, trotz einer Frequenzänderung konstant.

Die Methode ist für einen kleinen Bereich einer Frequenzänderung ( $f_N \pm 10\%$ ) gut geeignet, außerhalb sind die erhaltenen Ergebnisse zu hinterfragen. Wird die Simulationsmethode Continuous verwendet, werden die Reaktanzen für jeden Berechnungsschritt mit der aktuellen Frequenz berechnet.

### 4.3 Niederspannungsnetz - Block 1

Für die Nachbildung des Niederspannungsnetzes (Block 1) wird der Block "Three-Phase Source" aus der "SimPowerSystems" - Toolbox verwendet. Die Parameter für die Simulation sind in Tabelle 4.1 angegeben.

Parameter	Einheit	Wert
Phase-Phase Spannung	V	400
Winkel der Phase A	°	0
Frequenz	Hz	50
Kurzschlussimpedanz	$m\Omega$	$j0.1$

Tabelle 4.1: Parameter von Block 1

### 4.4 Leitungsmodell - Block 2

Das Leitungsmodell wird, wie in Abbildung 4.2 angedeutet, als T - Struktur aufgebaut. Dabei erfolgt von der linken Seite die Speisung vom Netz und von der rechten Seite die Speisung von der dezentralen Energieerzeugungsanlage. Die Quellen (Netz und DEA) speisen gemeinsam auf die Last (Block 4). Für die Modellierung der Leitungsstücke wird das Element "Three-Phase Series RLC Branch" verwendet. Die Parameter für die drei Leitungsstücke werden gleich groß gewählt. Für Niederspannungsnetze (aus Literatur [15]) kann für Niederspannungsfreileitungen ein induktiver Widerstand von  $0.4 \Omega/\text{km}$  angegeben werden. In Tabelle 4.2 sind die Werte angegeben.

Parameter	Einheit	Wert
Leitungslänge	m	400
Ohmscher Widerstand	$\Omega$	0
Induktiver Widerstand	$\Omega$	0.16
Kapazitiver Widerstand	$\Omega$	0

Tabelle 4.2: Parameter von Block 2

## 4.5 Dezentrale Energieerzeugungsanlage - Block 3

Als dezentrale Energieerzeugungsanlage fungiert eine Synchronmaschine. Als Simulationsmodell wird das Element "Synchronous Machine pu Standard" verwendet. Das Modell beruht auf den Gleichungen von "Paul Krause [7]" aus dem Buch "Analysis of Electric Machinery". Die Daten des Modells sind in Tabelle 4.3 angegeben. Für die Simulation wird das vordefinierte Modell Nr. 1 gewählt.

Parameter	Einheit	Wert
Nennscheinleistung	VA	8100
Phase-Phase Spannung	V	400
Frequenz	Hz	50
Ständerwiderstand	$\Omega$	0
Stationäre Reaktanz $x_d$	p.u.	1.8
Transiente Reaktanz $x_d'$	p.u.	0.18
Stationäre Reaktanz $x_d''$	p.u.	0.12

Tabelle 4.3: Parameter von Block 3

Als Eingangsgrößen des Maschinenmodells wird

- die mechanische Leistung  $P_M$  an der Welle sowie
- die Erregerspannung  $U_f$

vorgegeben. Beide Eingangsgrößen (Mechanische Leistung und Erregerspannung) werden als konstante Parameter festgelegt und werden unter Zuhilfenahme der Toolbox "Load Flow and Machine Initialization" ermittelt. Mithilfe der Toolbox können weitere Einstellungen an der Maschine durchgeführt werden - siehe Tabelle 4.4.

Parameter	Einheit	Wert
Maschinentyp	-	PV Generator
Phase-Phase Spannung	V	400
Einspeiseleistung	W	4000

Tabelle 4.4: Einstellungen in der Toolbox

Für die Simulationen wird eine Synchronmaschine mit Schenkelpollläufer herangezogen. Da der Luftspalt über dem Umfang nicht konstant ist, ändert sich der Wert der Induktivität  $L$  stetig. Der Wert ist von der Stellung der Polrades abhängig und daher erfolgt die

Aufspaltung in eine Längskomponente  $L_d$  und eine Querkomponente  $L_q$ . Überträgt man dieses Verhalten auf die Maschine, so sind die Parameter der Ströme, Spannungen und Flüsse jeweils in zwei Komponenten aufzuspalten. Für die Berechnung der tatsächlichen Größe ist eine Betragsbildung notwendig.<sup>1</sup>

## 4.6 Last - Block 4

Die Last wird als dreiphasiger ohmsch-induktiver Verbraucher nachgebildet. Als Zweckmäßigkeitsgründen wird die Last nicht als Parallel- sondern als Serienschaltung modelliert. Die Größe des Wirkleistungsverbrauchers wird mit 10 kW und des Blindleistungsverbrauchers mit 5 kVAr gewählt. Für die Simulation wird das Element "Three-Phase Series RLC Load" verwendet. Die eingestellten Parameter sind in Tabelle 4.5 angegeben.

Parameter	Einheit	Wert
Konfiguration	-	Sternschaltung
Phase-Phase Spannung	V	400
Frequenz	Hz	50
Wirkleistung	kW	10
Blindleistung	kVAr	5
Ohmscher Widerstand	$\Omega$	12.8
Induktiver Widerstand	$\Omega$	6.4

Tabelle 4.5: Parameter von Block 4

## 4.7 Reaktionszeit der Überstromschutzelemente

Für die Simulation unterschiedlicher Fehlerzustände werden in *Matlab/Simulink*<sup>©</sup> zeitliche Abläufe für die Reaktion der Überstromschutzelemente definiert. Abbildung 4.3 zeigt den zeitlichen Ablauf in Form eines Balkendiagramms.

<sup>1</sup>Anmerkung für die Simulation: Da die Synchronmaschine in Simulink als Stromquelle nachgebildet ist, ist eine parallele Impedanz vorzusehen, damit der Stromwert in einen Spannungswert transferiert wird. Aus rechentechnischen Gründen wird für die Impedanz ein ohmscher Widerstand mit 10 k $\Omega$  gewählt. Die Größe der Parallelimpedanz ist derart zu wählen, dass nur ein kleiner Betrag der Einspeiseleistung verloren geht.

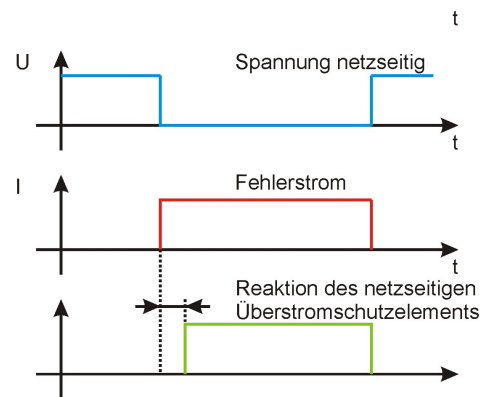


Abbildung 4.3: Zeitlicher Ablauf bei Auftritt eines dreipoligen Fehlers

Als Fehlerdauer wurde eine Zeitspanne von 150 ms gewählt. Der Fehler startet beim Zeitpunkt  $t = 2$  Sekunden und dauert 150 ms an. Das speisende Netz wird bei  $t = 2.02$  s abgeschaltet (20 ms Verzögerung für das Schutzelement) und bei  $t = 2.17$  s wird der Fehler als abgeschaltet angenommen, jener Augenblick in dem die Netzspannung wieder kommt (willkürliche Annahme). Die Fehlerlöschung erfolgt verzögerungsfrei. Zusätzlich wird die Annahme getroffen, dass das Überstromschutzelement der Synchronmaschine nicht auf den auftretenden Fehlerstrom reagiert. In der Zeit zwischen  $t = 2.02$  s und  $t = 2.17$  s ist die Synchronmaschine der einzige Energieversorger für die Lasten.

# 5 Allgemeines - Analytische Berechnungen

## 5.1 Berechnung der Drehzahl

Unter der Annahme eines stationären Betriebspunktes, behält die Synchronmaschine ihre synchrone Drehzahl  $\omega_s$  sowie ihren Polradwinkel  $\vartheta$  bei. Dieses Verhalten ist gegeben, wenn ein Gleichgewicht zwischen der mechanisch eingespeisten und der elektrisch abgegebenen Leistung herrscht. Dieses Verhalten kann durch

$$J\dot{\omega}_m = M_T - M_E - D \cdot (\omega_m - \omega_{m,n}) \quad (5.1)$$

beschrieben werden. Ist der Ausgleich der Leistungen durch das Auftreten instabiler Zustände, wie zum Beispiel durch

- Leistungsungleichgewichte
- Kurzschlüsse
- Leitungsabschaltung und
- Netzabschaltung (= Übergang in den Inselbetrieb)

nicht mehr gegeben, wird das Polrad entweder beschleunigt oder verzögert.

Ist die eingespeiste mechanische Leistung  $P_M$  größer als die elektrisch abgeführte bzw. verbrauchte Leistung  $P_E$ , wird die Differenz in kinetische Energie umgewandelt und das Polrad beginnt zu beschleunigen. Mit dem Geschwindigkeitsanstieg des Polrades ist mit einem Ansteigen der Frequenz zu rechnen. Wird jedoch mehr elektrische Leistung von den Lasten verbraucht als mechanisch eingespeist wird, ist mit einer Verzögerung des Polrades zu rechnen. Es erfolgt eine Umwandlung der kinetischen Energie des Polrades in elektrische Energie.

Um dem Abweichen der Drehzahl entgegenzuwirken, ist eine Regeleinrichtung für die Turbinenleistung vorzusehen. Durch eine Regelung der Erregerspannung wird erreicht, dass die Klemmenspannung  $U$  der Maschine in jedem möglichen Betriebszustand konstant gehalten werden kann.

### 5.1.1 Berechnung der Anlaufzeitkonstante

Unter Vernachlässigung der Dämpfung kann die Anlaufzeitkonstante  $T_J$  aus dem Gleichgewicht der Momente berechnet werden (siehe [14]).

$$\omega_{m,n} = \int_0^{T_J} \dot{\omega}_m dt = \frac{M_{T,n}}{J} T_J \quad (5.2)$$

$$T_J = \frac{J \cdot \omega_{m,n}}{M_{T,n}} = \frac{J \cdot \omega_{m,n}^2}{S_N} = \frac{J \cdot \omega_n^2}{S_N \cdot p^2} \quad (5.3)$$

Anstelle der Anlaufzeitkonstante  $T_J$  wird oft die normierte Trägheitskonstante  $H$  angegeben, wobei gilt

$$H = \frac{1}{2} T_J \quad (5.4)$$

### 5.1.2 Drehzahlberechnung unter Vernachlässigung der Dämpfung $D$

Tritt eine Differenz zwischen der mechanisch gelieferten und elektrisch abgegebenen Leistung auf, so ist mit einer Drehzahlabweichung  $\Delta\omega$  aus dem stationären Punkt  $\omega_s$  zu rechnen. Die aktuelle Drehzahl errechnet sich zu:

$$\omega_{el} = \omega_s + \Delta\omega_s \quad (5.5)$$

Der Term der Drehzahlabweichung  $\Delta\omega$  kann durch das Leistungsungleichgewicht an der Synchronmaschine berechnet werden. Die Differenzleistung ergibt sich zu:

$$\Delta P(t) = P_M(t) - P_E(t) \quad (5.6)$$

Der zusätzliche Term kann durch

$$J\dot{\omega} = \frac{\Delta P(t)}{\omega} = \frac{P_M - P_E}{\omega} \quad (5.7)$$

berechnet werden. Da in der Simulation die mechanische Leistung  $P_M$  vorgegeben wird, wird Gleichung 5.7 mit der Beziehung

$$P = M\omega \quad (5.8)$$



zu

$$J\dot{\omega} = \frac{P_M}{\omega} - M_E \quad (5.9)$$

umgeformt. Als Anfangsbedingung für die Integration zum Zeitpunkt  $t = 0$  s gilt:

$$\omega(t = 0) = \omega_s \quad (5.10)$$

Für die Berechnung kann entweder Gleichung 5.11

$$\omega = \omega_s + \frac{1}{J} \int_0^t \frac{P_M - P_E}{\omega} dt \quad (5.11)$$

oder Gleichung 5.12

$$\omega = \omega_s + \frac{2}{T_J} \int_{t_0}^{t_1} \left( \frac{P_M}{\omega} - M_E \right) dt \quad (5.12)$$

in *Matlab/Simulink*® implementiert werden. Gleichung 5.12 wird verwendet, wenn anstelle des Trägheitsmoments  $J$  die Anlaufzeitkonstante  $T_J$  gegeben ist. Beide Berechnungsvorschriften (Gleichung 5.11 und 5.12) liefern das gleiche Ergebnis. Die Anlaufzeitkonstante  $T_J$  kann aus den Nenndaten der Maschine berechnet werden.

$$T_J = \frac{J \cdot \omega_N^2}{S_N \cdot p^2} \quad (5.13)$$

Um die aktuelle Drehzahl zu ermitteln, besteht die Möglichkeit, die Formeln in *Matlab/Simulink*® zu implementieren, jedoch wurde Gleichung 5.12 realisiert. Abbildung 5.1 zeigt den Koppelplan, welcher in Simulink erstellt wurde.

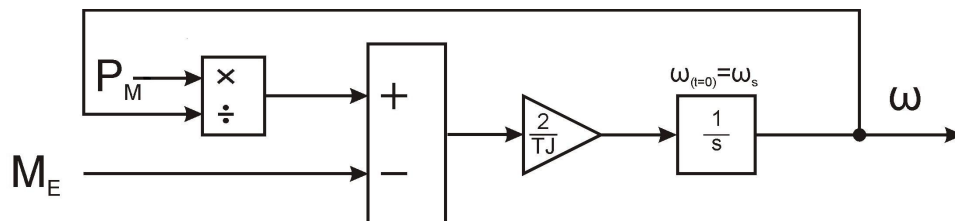


Abbildung 5.1: Koppelplan für die Drehzahlberechnung bei bekannten Leistungen

Alternativ kann die aktuelle Drehzahl durch Auflösen der Gleichung 5.12 bestimmt werden. Bei der Umsetzung der Formel in *Matlab/Simulink*® ist die Integration durch ein Näherungsverfahren zu ersetzen. Für die Integration wurde die Trapezregel verwendet. Es ist darauf zu achten, dass der Zeitschritt zwischen zwei Stützpunkten nicht zu groß, im Verhältnis zur Netzperiodendauer (20 ms), gewählt wird.

### 5.1.3 Drehzahlberechnung unter Berücksichtigung der Dämpfung D

Die Dämpfung bzw. die Verluste der Synchronmaschine werden als linear von der Frequenz abhängig angenommen. Zusätzlich geht in die aktuell berechnete Drehzahl die Dämpfung  $D$  mit ein. Durch Hinzufügen des Terms  $k_D \cdot \omega$  erweitert sich Gleichung 5.9 zu

$$J\dot{\omega} = \frac{P_M}{\omega} - M_E - D \cdot \omega \quad (5.14)$$

Der Koppelplan aus Abbildung 5.1 wird um den Term der Dämpfung  $D$ , Abbildung 5.2, erweitert.

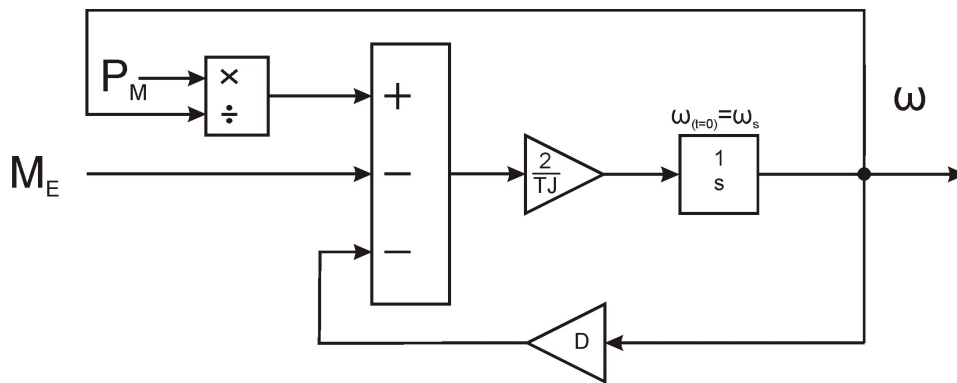


Abbildung 5.2: Berücksichtigung der Dämpfung

## 5.2 Regler für die Erregerspannung

Für die Regelung der Erregerspannung wird der Absolutbetrag der Generator - Klemmenspannung benötigt. Da in diesem Fall die Längs- und Querkomponenten ( $u_d$  und  $u_q$ ) unter der Annahme eines stationären Betriebspunktes bekannt sind, kann die Klemmenspannung berechnet werden.

$$u_d = U \cdot \sin\vartheta = -i_d \cdot R + i_q \cdot x_q \quad (5.15)$$

$$u_q = U \cdot \cos\vartheta = -i_q \cdot r - i_d \cdot x_d \quad (5.16)$$

Die zu entwerfende Reglereinrichtung erhält die Information von  $u_d$  und  $u_q$  und sorgt dafür, dass die Klemmenspannung  $U$  immer auf Nennspannung  $U_N$  gehalten wird. Durch diese Maßnahme wird die Klemmenspannung in jedem beliebigen Betriebspunkt angepasst. Durch die geometrische Addition der Gleichungen (5.15 und 5.16) und durch die

Anwendung der eulerschen Gleichungen ergibt sich die Klemmenspannung  $U$  sowie der Polradwinkel  $\vartheta$  der Maschine.

$$U = u_d + j \cdot u_q = U \cdot \sin\vartheta + j \cdot U \cdot \cos\vartheta = jU \cdot e^{-j\vartheta} \quad (5.17)$$

Äquivalent zur Berechnung der Klemmenspannung  $U$  kann auch der Strangstrom der Maschine aus den dq - Komponenten berechnet werden.

$$i_d = i \cdot \sin(\vartheta + \varphi) \quad (5.18)$$

$$i_q = i \cdot \cos(\vartheta + \varphi) \quad (5.19)$$

### 5.2.1 Modellierung des Reglers

Damit folgende Berechnungen einfach gestaltet werden können, wird mit dem Regler erzielt, dass die Klemmenspannung  $U$  der Nennspannung  $U_N$  entspricht und sich nicht verändert. Um die Konstanz zu gewährleisten, damit analytische Berechnungen und Simulationen in Simulink das gleiche Ergebnis liefern, wird ein PI - Regler für die Erregerspannung  $U_f$  modelliert. Der PI - Regler ergibt sich aus [9] wie folgt:

$$R(s) = V \left( 1 + \frac{1}{T_N \cdot s} \right) \quad (5.20)$$

Der Regler kann wie Abbildung 5.3 zu sehen ist realisiert werden, wobei als zu regelnde Strecke die Synchronmaschine fungiert. Dabei erfolgt die Regelung auf per unit bezogene Größen.

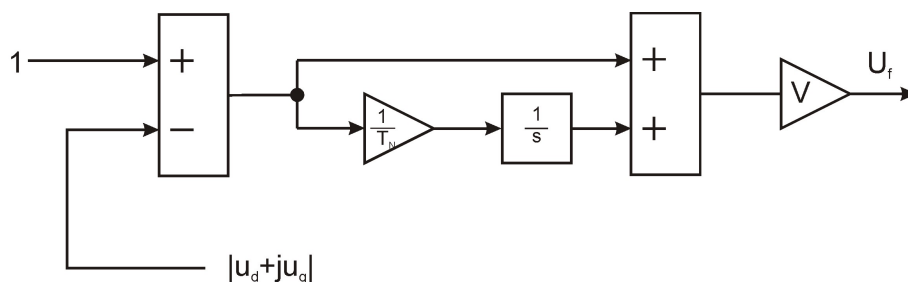


Abbildung 5.3: Regeleinrichtung für die Erregerspannung

Die Parameter des PI - Regler werden so gewählt, dass ein optimales Erreichen des Nennpunktes erzielt wird. Der Regler vergleicht den Absolutwert der d- und q- Komponente der Klemmenspannung  $U$  mit dem gewünschten p.u. Wert von 1. Durch den Eingriff des Reglers in die Erregereinrichtung der Synchronmaschine, wird die Erregerspannung  $U_f$  für jede Belastung angepasst.

## 5.3 Berechnung der Fehlerströme mit symmetrischen Komponenten

### 5.3.1 Allgemeines

Die Berechnung des Netzes mittels symmetrischer Komponenten erfolgt gemäß [4]. Durch Anwenden der Symmetrierungsmatrix erfolgt eine Aufspaltung des symmetrischen und unsymmetrischen Drehstromsystems in die Komponenten des Null-, Mit- und Gegensystems. Bei fehlerfreier Netzbetrachtung bleibt nach Symmetrierung das Mitsystem übrig. Die beiden anderen Komponenten sind im Fehlerfall von Null verschieden. Die Symmetrierungsmatrix ergibt sich gemäß [4] zu:

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{L1} \\ U_{L2} \\ U_{L3} \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Für die Rücktransformation wird die inverse der Transformationsmatrix verwendet.

$$\begin{bmatrix} U_{L1} \\ U_{L2} \\ U_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

Um die Berechnungen durchführen zu können, ist der folgende Ablauf bei der Fehlerberechnung mit symmetrischen Komponenten einzuhalten:

1. Aufstellen der Fehlerbedingungen und Erstellen des Schaltbildes
2. Transformation mittels Symmetrierungsmatrix
3. Berechnung des Strombeitrages der Synchronmaschine anhand der eingespeisten Leistung
4. Berechnung der Fehlerströme von Netz und Synchronmaschine
5. Rücktransformation mittels der Entsymmetrierungsmatrix
6. Berechnung der Leistung am Sicherungsautomaten
7. Berechnung der Leistungen an den Leitungselementen ( $P = I^2 R$ )
8. Ergebnis: Aussage über das Drehzahlverhalten der Synchronmaschine

### 5.3.2 Dreipoliger Kurzschluss - Allgemeines

Die Fehlerbedingungen bei einem dreipoligen Kurzschluss lauten gemäß [4]

$$U_{L1} = U_{L2} = U_{L3} \quad (5.23)$$

$$I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} = 0 \quad (5.24)$$

Den Fehlerbedingungen liegt folgendes Ersatzschaltbild aus Abbildung 5.4 in Phasenschreibweise zu Grunde.

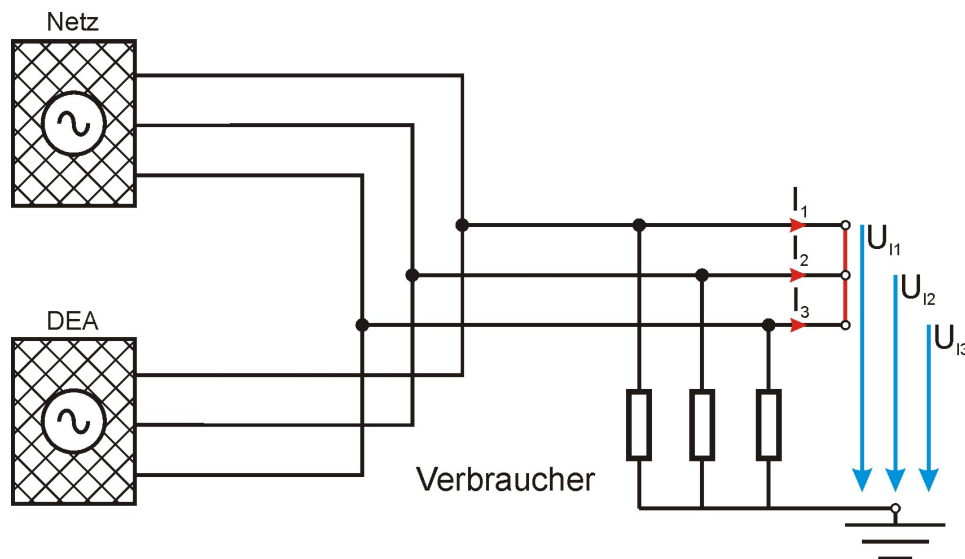


Abbildung 5.4: Ersatzschaltbild in Phasenschreibweise

Durch das Anwenden der Fehlerbedingungen auf die Symmetrierungsmatrix erhält man die Fehlerbedingungen in symmetrischen Komponenten.

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{L1} \\ U_{L1} \\ U_{L1} \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

Für die Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  ergibt sich

$$U_1 = U_2 = 0 \quad (5.26)$$

und für den Strom  $I_0$  des Nullsystems

$$I_0 = 0 \quad (5.27)$$

Da bei Fehlereintritt das speisende Netz abgeschaltet wird, ist die Synchronmaschine die einzig speisende Quelle. Abbildung 5.5 zeigt das Ersatzschaltbild nach der Anwendung der Symmetrischen Komponenten.

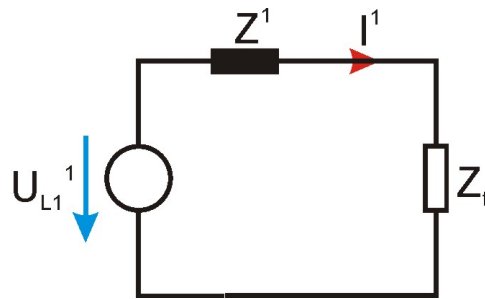


Abbildung 5.5: Ersatzschaltbild in symmetrischen Komponenten

Der Fehlerstrom errechnet sich zu:

$$\underline{I}^1 = \frac{\underline{U}_L^1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_f} \quad (5.28)$$

$$(5.29)$$

Für den Fehlerstrom in Phasenschreibweise ist eine Rücktransformation mit der Entsymmetrierungsmatrix erforderlich. Da es sich um einen dreipoligen Fehler handelt, ist der Strom  $I_1$  des Mitsystems der gesuchte Fehlerstrom  $I_f$ . Mit dem errechneten Fehlerstrom ist es möglich, die umgesetzte Wirkleistung in den Leitungselementen und an der Fehlerstelle zu berechnen, und es kann eine Aussage über das Drehzahlverhalten der Synchronmaschine getroffen werden.

## 5.4 Kurzschlussvorgang von Synchrongeneratoren

### 5.4.1 Theoretische Grundlagen

Für die Berechnung der Kurzschlussströme wird folgendes Szenario angenommen: Es erfolgt ein Kurzschluss auf der Lastseite und das netzseitige Überstromschutzelement löst aus. Das DEA - seitige Überstromschutzelement löst infolge des Kurzschlusses nicht aus, sodass die Energielieferung nicht unterbrochen wird.

### 5.4.2 Gesamtkurzschlussstrom

Laut [10] zusammen, ergibt sich der Kurzschlusswechselstrom eines Synchrongenerators zu:

$$I_K(t) = (I_{K''} - I_{K'})e^{-\frac{t}{T_{DN''}}} + (I_{K'} - I_K)e^{-\frac{t}{T_{DN'}}} + I_K \quad (5.30)$$

Die Zeitkonstanten sind von den Reaktanzen der Synchronmaschine sowie den vorhandenen Elementen im Netz abhängig.

$$T_{DN''} = T_{d0''} \frac{x_{d''} - x_N}{x_{d''} + x_N} \quad (5.31)$$

$$T_{DN'} = T_{d0'} \frac{x_{d'} - x_N}{x_{d'} + x_N} \quad (5.32)$$

Der Kurzschlussgleichstrom folgt der Formel

$$I_{DC}(t) = I_{K''} \sin \varphi e^{-\frac{t}{T_{AN}}} \quad (5.33)$$

mit

$$T_{AN} = \frac{x_d'' + x_N}{\omega(R_S + R)} \quad (5.34)$$

Durch die Addition beider Stromanteile (5.30 und 5.33) erhält man den Kurzschlussstrom der Synchronmaschine.

$$I_K(t) = (I_{K''} - I_{K'}) e^{-\frac{t}{T_{DN''}}} + (I_{K'} - I_K) e^{-\frac{t}{T_{DN'}}} + I_K + I_{K''} \sin \varphi e^{-\frac{t}{T_{AN}}} \quad (5.35)$$

Für die Zerlegung des Gesamtkurzschlussstromes (Formel 5.35) in die zeitlichen Phasen

- subtransiente
- transient
- stationär

wird das Ersatzschaltbild aus Abbildung 5.6 verwendet.

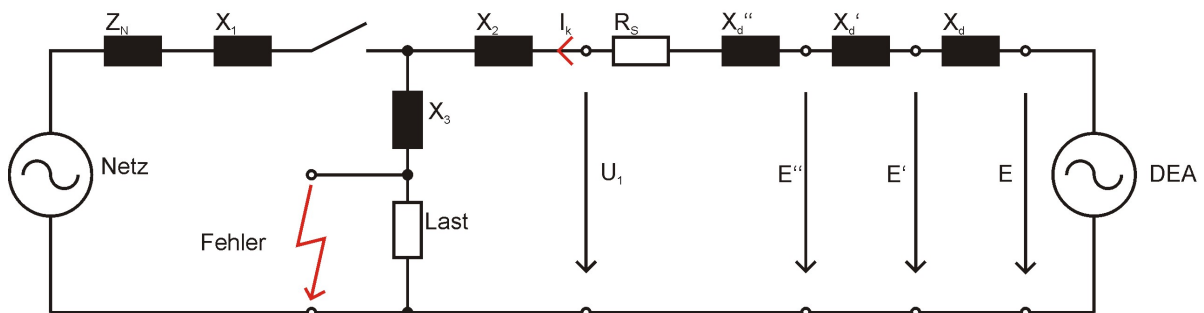


Abbildung 5.6: Fehler auf der Lastseite und Netzabschaltung

Da der Kurzschluss einen zeitlichen Verlauf unterlegen ist, sind bei den jeweiligen Zeitaußenblicken unterschiedliche Spannungsquellen für den Kurzschlussstrom treibend. Bildet

man in Abbildung 5.6 einen Maschenumlauf ergibt sich, für jede treibende Quelle ( $E$ ,  $E'$  und  $E''$ ) der Zusammenhang zwischen der Klemmenspannung, Klemmenstrom und der jeweilig wirksamen Reaktanz. Im Zeigerdiagramm aus Abbildung 5.7 ist der Zusammenhang der drei Größen ersichtlich, wobei der Ständerwiderstand vernachlässigt wurde.

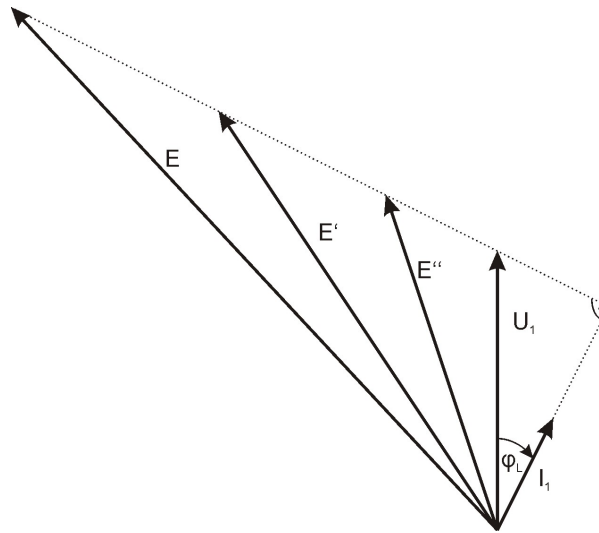


Abbildung 5.7: Zeigerdiagramm der unterschiedlichen Polradspannungen

Für die Berechnung der unterschiedlichen Polradspannungen wird die Betriebsspannung  $U_1$  und der Betriebsstrom  $I_1$  vor Fehlereintritt verwendet. Als Belastungswinkel  $\varphi_L$  wird die Phasenverschiebung zwischen der Betriebsspannung einer Phase und dem Strom derselben Phase herangezogen, der sich aus dem Betriebspunkt der Synchronmaschine vor der Störung am Netz ergibt.

### 5.4.3 Subtransienter Zeitbereich

Während der subtransiente Kurzschlussstrom wirksam ist, wird der gesamte magnetische Fluss in den Luftspalt verdrängt. Da die Luftspaltinduktivität relativ klein ist, sind die Kurzschlussströme am stark ausgeprägt. Je besser die Dämpferwicklung ausgeführt ist, umso kleiner wird die Induktivität und diese bewirkt ein Anwachsen der Ströme. Bei Maschinen mit kleinen Leistungen kann der Strom aufgrund der kleinen subtransienten Zeitkonstante vernachlässigt werden. Dieser klingt innerhalb einiger Netzperioden ab und hat keine Wirkung mehr.



Die treibende subtransiente Spannung  $E''$  ergibt sich näherungsweise zu:

$$E'' = U_1 + X_{d''} I_1 \sin(\varphi_L) \quad (5.36)$$

$$\underline{E}'' = \underline{U}_1 + jX_{d''} \underline{I}_1|_{(t=-0)} \quad (5.37)$$

Der subtransiente Kurzschlussstrom folgt der Beziehung:

$$\underline{I}_K'' = \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_{ges''}} \quad (5.38)$$

#### 5.4.4 Transienter Zeitbereich

Beim Übergang vom subtransienten zum transienten Kurzschlussstrom verliert die Dämpferwicklung ihre Wirkung und der magnetische Fluss umschließt diese. Damit verringert sich der Weg im Luftspalt und die wirksame Induktivität bzw. deren Wirkung wird größer, der Strom jedoch kleiner. Um die Größe des transienten Kurzschlussstromes zu berechnen, wird die transiente Polradspannung benötigt. Näherungsweise errechnet sich die Polradspannung zu:

$$E' = U_1 + X_d I_1 \sin(\varphi_L) \quad (5.39)$$

$$\underline{E}' = \underline{U}_1 + jX_d \underline{I}_1|_{(t=-0)} \quad (5.40)$$

$$\underline{I}'_K = \frac{\underline{E}'}{\underline{Z}_{ges'}} \quad (5.41)$$

#### 5.4.5 Stationärer Zeitbereich

Nach genügend langer Zeit erfolgt der Übergang von transienten zu stationären Verhältnissen und die Erregerwicklung verliert ihre Wirkung gegenüber der Flussänderung. Nach dem letzten Übergang wird der stationäre Kurzschlussstrom ins Netz geliefert und errechnet sich zu

$$\underline{I}_K = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{ges}} \quad (5.42)$$

wobei für die Polradspannung

$$E = \sqrt{(U_1 + X_d I_1 \sin(\varphi_L))^2 + (X_d I_1 \cos(\varphi_L))^2} \quad (5.43)$$

$$\underline{E} = \underline{U}_1 + jX_d \underline{I}_1|_{(t=-0)} \quad (5.44)$$

einzusetzen ist. Da die stationäre Reaktanz  $x_d = 1.8$  p.u. größer als die transiente  $x_{d'} = 0.18$  p.u. sowie die subtransiente  $x_{d''} = 0.1$  p.u. ist, sind die getroffenen Näherungen (Kapitel 5.4.3 und 5.4.4) durch Vernachlässigung des Terms  $X_d I_1 \cos(\varphi_L)$  aus Gleichung 5.43 gültig.

## 5.5 Berechnung der Generatorleistung

Für die Berechnung der Netzkennlinien werden stabile Zustände vorausgesetzt. Erfolgt an einer zu untersuchenden Synchronmaschine ein dynamischer Übergang zwischen zwei stationären Betriebspunkten, kann bei Kenntnis der Wirkleistung  $P_E$  und des Polradwinkel  $\vartheta$  auf die Netzkennlinie geschlossen werden. Die zu einem Zeitpunkt abgegebene Leistung ist von der maximal übertragbaren Leistung  $P_{E_{max}}$  und dem Polradwinkel  $\vartheta$  abhängig und errechnet sich zu:

$$P_E = P_{E_{max}} \cdot \sin\vartheta \quad (5.45)$$

Die maximal übertragbare Leistung  $P_{E_{max}}$  ist durch

$$P_{E_{max}} = \frac{EU}{X} \quad (5.46)$$

gegeben.

## 6 Berechnung und Simulationen relevanter Aufgabenstellungen

Um das Verhalten der Synchronmaschine im Niederspannungsnetz untersuchen zu können, werden unterschiedliche dynamische Zustände simuliert und analysiert. Für die Simulation wird der in Kapitel 4 beschriebene Systemaufbau umgesetzt und die Parameter übernommen.

### 6.1 Trennung der unbelasteten Synchronmaschine vom Netz

#### 6.1.1 Aufgabenstellung

Bei der Trennung der Synchronmaschine vom Netz wird das Verhalten untersucht, wenn ein Schutzschalter schlagartig geöffnet wird und die Energielieferung von der Synchronmaschine unterbrochen ist. In Abbildung 6.1 ist die zugrunde liegende Netztopologie zu sehen. Die Parameter für die Simulation sind in Kapitel 4 aufgelistet.

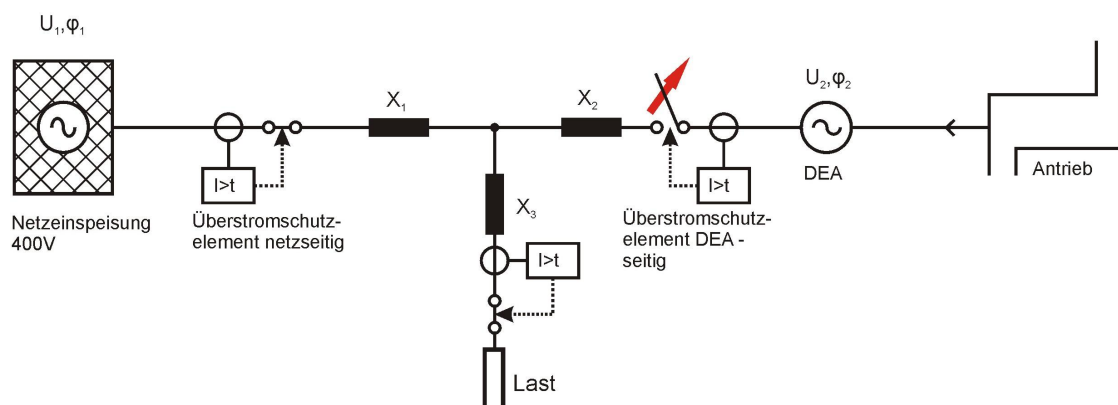


Abbildung 6.1: Trennung der Synchronmaschine vom Netz

## 6.1.2 Simulation

Als Ergebnis ist zu erwarten, dass nach Schalteröffnung die Synchronmaschine zu beschleunigen beginnt. Die eingespeiste Leistung über die Welle kann nicht mehr ins Netz geliefert werden und wird in kinetische Energie umgewandelt. Es entsteht ein positiver Integrationsbeitrag (siehe Gleichung 5.11) und das Polrad beschleunigt. Abbildung 6.2 zeigt die Klemmenspannung, Drehzahl und den Polradwinkel.

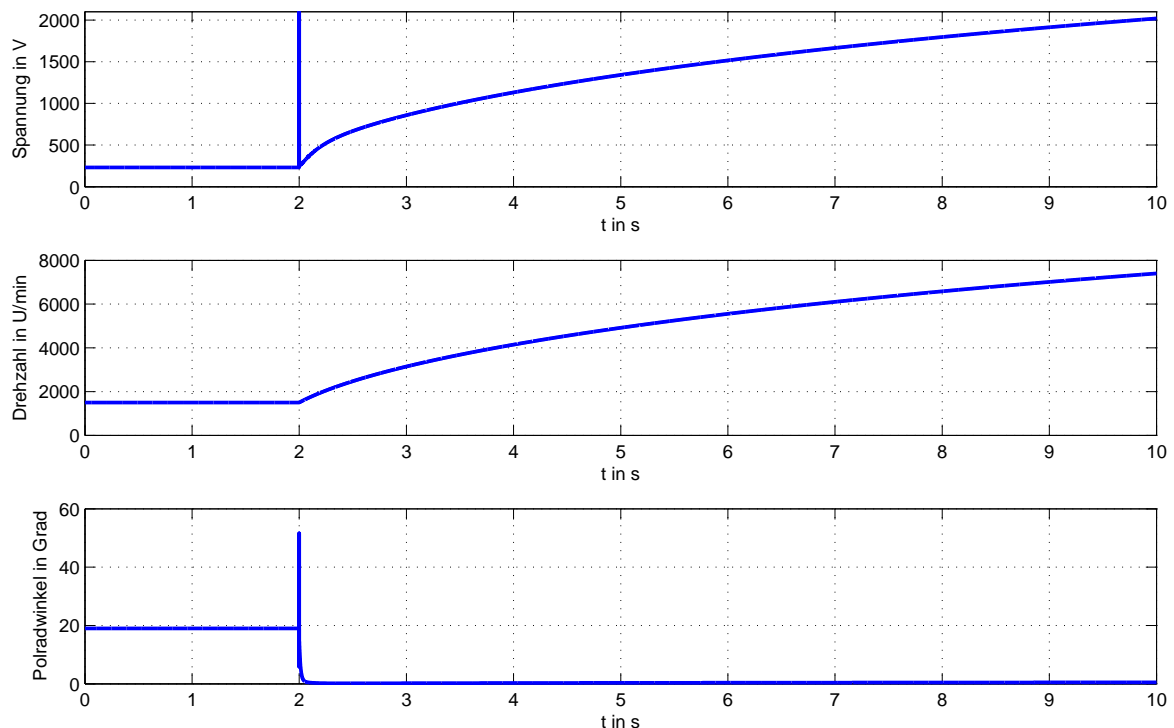


Abbildung 6.2: Verhalten der Synchronmaschine bei Trennung vom Netz

Nach Öffnung des netzseitigen Überstromschutzelements, wird von der Synchronmaschine kein Strom mehr geliefert und die Phasenverschiebung zwischen der Polradspannung  $E$  und der Klemmenspannung  $U$  verschwindet, d.h. der Polradwinkel wird zu Null. Die gesamte über die Welle eingespeiste Leistung beschleunigt das Polrad. Zur Vermeidung mechanischer Schäden ist die Wellenleistung zu reduzieren.

Da die Simulation auf 50-Hz Vorgänge beschränkt ist, ist die Analyse der auftretenden dynamischen Spitze (im Zeitpunkt der Trennung der Synchronmaschine bei  $t = 2$  s) nicht von Bedeutung. Die Zeitdauer liegt unter einer Millisekunde und hat Netztechnisch keine Wirkung.

## 6.2 Trennung der belasteten Synchronmaschine vom Netz

### 6.2.1 Aufgabenstellung

Bei der Betrachtung "Abschaltung des speisenden Netzes" wird die Verbindung zwischen Netz und Last geöffnet (siehe Abbildung 6.3).

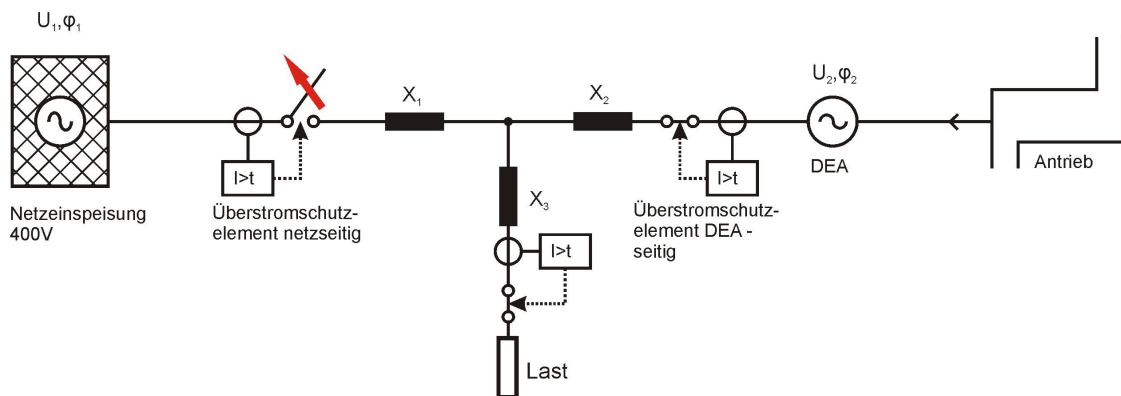


Abbildung 6.3: Abschaltung des speisenden Netzes

Durch das Öffnen des Schalters entsteht ein Ungleichgewicht zwischen der zu- und abgeführten Leistung an der Synchronmaschine.

### 6.2.2 Berechnung

Die Impedanz der Last errechnet sich zu:

$$Z_L = R_L + jX_L = 12.8 + j6.4 = 14.31e^{j26.57^\circ} \Omega \quad (6.1)$$

Solange das netzseitige Überstromschutzelement nicht auslöst, fließt der Summenstrom von Netz und Synchronmaschine zur Last. Dabei kann der Spannungsabfall der Leitung vernachlässigt werden.

$$I_{ges} = \frac{U_{ph}}{Z_L} = \frac{230.94V}{14.31e^{j26.57^\circ} \Omega} = 16.14e^{-j26.56^\circ} A \quad (6.2)$$

Nach Netztrennung versorgt die Synchronmaschine als einzige speisende Quelle die Last, und bestimmt aufgrund dieser Tatsache die Frequenz im betrachteten Modellnetz. Da die Simulationen mit der Phasor-Methode durchgeführt werden, und diese die verwendete Lastimpedanz auf die Nennfrequenz von 50-Hz bezieht, sind die erhaltenen Ergebnisse ab Frequenzen  $f > f_N \pm 10\%$  fraglich. Für die Berechnung wird Abbildung 6.4 verwendet.

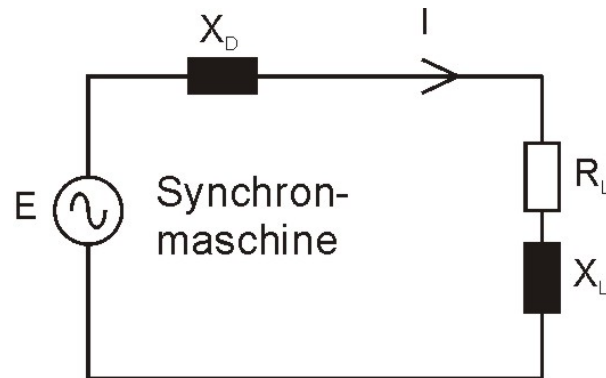


Abbildung 6.4: Ersatzschaltbild für die Berechnung

Durch die Lastfluss-Berechnung ergibt sich eine Polradspannung  $E$  von 1.77 p.u. Die stationäre Reaktanz  $X_d$  der Synchronmaschine ergibt sich zu:

$$X_d = x_{d(p.u.)} \frac{U^2}{S_N} = 1.8 \frac{400V^2}{8100V} = j35.55\Omega \quad (6.3)$$

Der Strom nach Abschaltung des speisenden Netzes kann aus der Polradspannung und den Impedanzen berechnet werden.

$$I = \frac{E_{p.u.} \cdot U_N}{R_L + jX_d + jX_L} = \frac{1.77 \cdot 230.94V}{12.8\Omega + j6.4\Omega + j35.55\Omega} = 9.31e^{-j73.00^\circ} A \quad (6.4)$$

Mit dem errechneten Strom kann nach Trennung des speisenden Netzes, die umgesetzte Wirk- und Blindleistung am Lastelement  $Z_L$  berechnet werden.

$$P_L = 3|I|^2 R_L = 3 \cdot 9.31A^2 \cdot 12.8\Omega = 3334.62W \quad (6.5)$$

$$Q_L = 3|I|^2 X_L = 3 \cdot 9.31A^2 \cdot 6.4\Omega = 1667.31Var \quad (6.6)$$

Die Differenz zwischen der mechanisch eingespeisten Leistung  $P_M$  und elektrisch verbrauchten Leistung  $P_L$  beschleunigt das Polrad der Synchronmaschine.

$$P_{Diff} = P_M - P_L = 4000W - 3334.62W = 665.4W \quad (6.7)$$

Die Spannung ergibt sich zu:

$$U = I \cdot Z_L = 9.31e^{-j73.00^\circ} A \cdot 14.31e^{j26.57^\circ} \Omega = 134.99V \quad (6.8)$$

### 6.2.3 Simulation

In Abbildung 6.5 ist das Verhalten bei Netztrennung zu sehen.

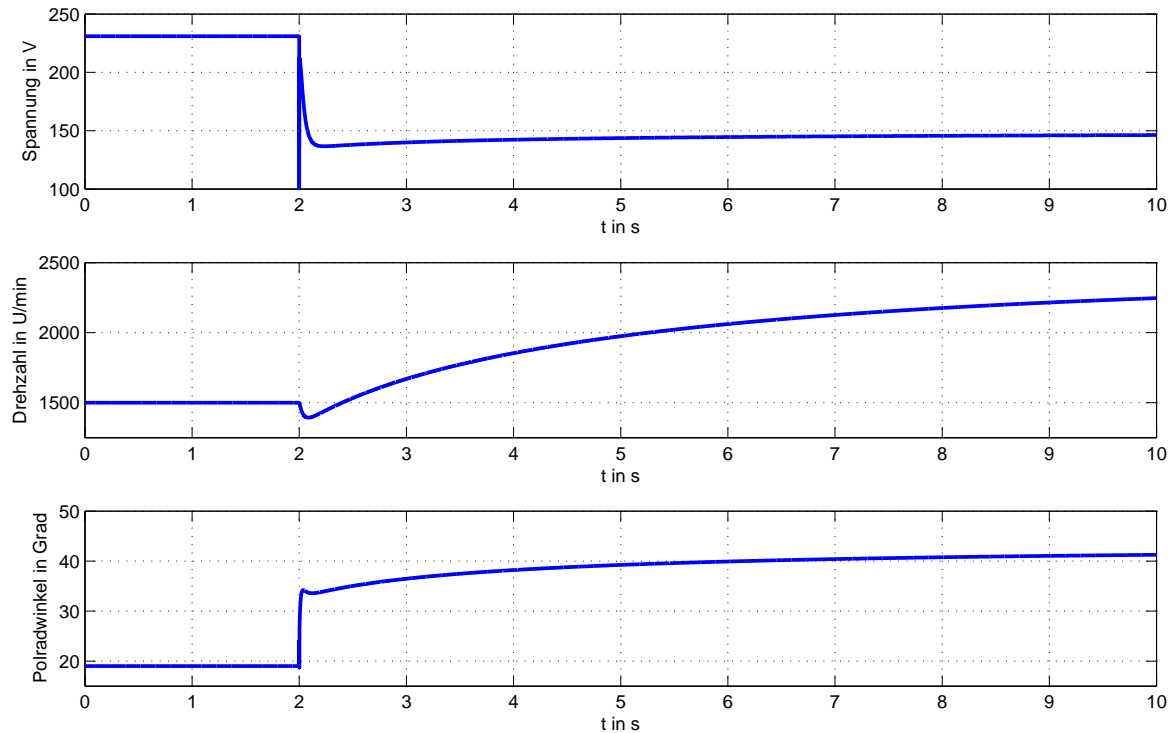


Abbildung 6.5: Verhalten der Synchronmaschine bei Öffnen des Netzschalters

Unter genauerer Betrachtung von Abbildung 6.5 ist zu erkennen, dass die Drehzahl der Synchronmaschine im Moment der Abschaltung des speisenden Netzes ( $t = 2$  s) einsinkt. Da die Simulation auf 50-Hz Vorgänge beschränkt ist, ist die Analyse der auftretenden dynamischen Spitze nicht von Bedeutung. Die Zeitdauer der "Spannungseinsenkung" ist simulationstechnisch bedingt und liegt unter einer Millisekunde und hat netztechnisch keine Wirkung. Weiters ist aus der Abbildung 6.5 zu entnehmen, dass die Spannung trotz steigender Drehzahl annähernd konstant bleibt. Dieses Phänomen kommt daher, dass die Synchronmaschine mit einer Leistung von 8.1 kVA (siehe Kapitel 4.5) nicht in der Lage ist, eine Last mit einer Scheinleistung von  $S = 10\text{kW} + j5\text{kVAr}$  allein zu versorgen. Da die Drehzahl der Maschine steigt, steigt zusammen mit der Polradspannung  $E$  die stationäre Reaktanz  $X_d$  der Maschine an (siehe Abbildung 6.4). Die stationäre Reaktanz  $X_d$  der Synchronmaschine ändert sich gegenüber der Lastreaktanz dadurch, da die aktuelle Drehzahl bzw. Frequenz zur Berechnung der Flusskomponenten der Maschine verwendet wird. Die Reaktanz der Last bleibt, wie schon erwähnt, bei der Berechnung

mit der Phasor-Methode konstant. Dadurch, dass der Strom annähernd gleich bleibt, stellt sich die Spannung der Lastseite auf einen konstanten Wert ein. Abbildung 6.6 zeigt einen Detailausschnitt zu jenem Zeitpunkt ( $t = 1.9 \text{ s}$  bis  $2.5 \text{ s}$ ).

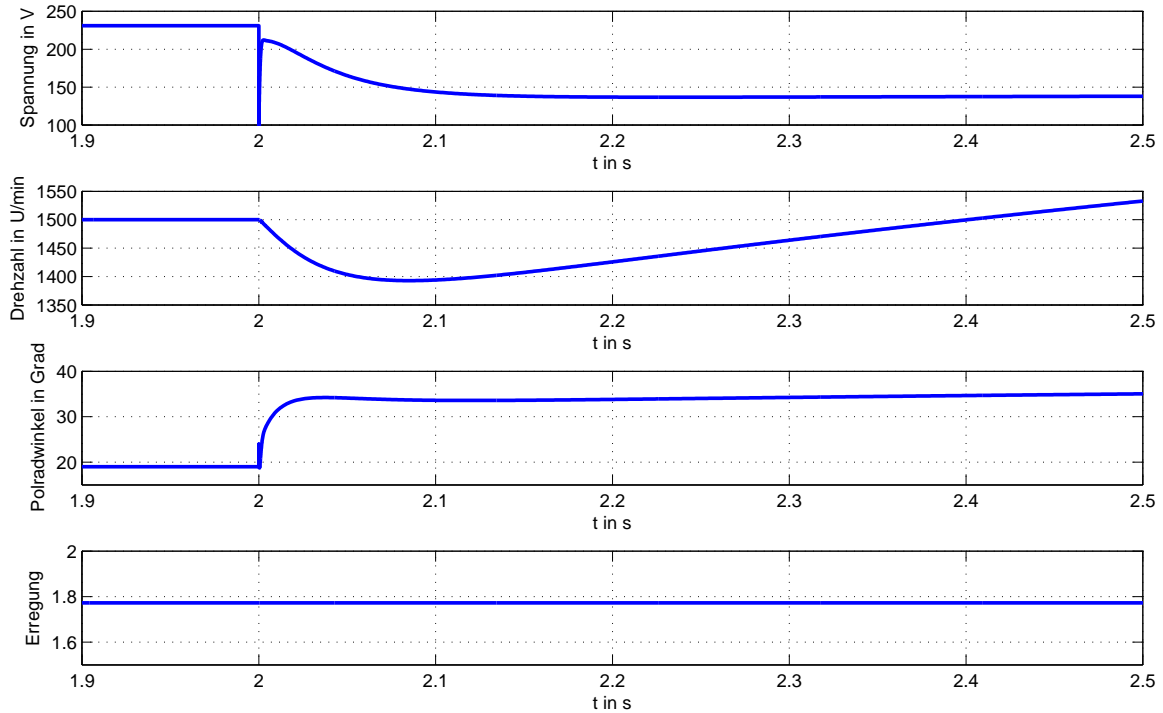


Abbildung 6.6: Detailausschnitt von Abbildung 6.5

Der Drehzahleinbruch bei Öffnung des Netzschalters ist dadurch erklärbar, dass sich die Spannung nicht sofort auf den neuen Wert einstellt sondern ein dynamischer Übergang stattfindet. Im ersten Moment benötigen die Lasten mehr Leistung als von der Synchronmaschine eingespeist wird und bremsen diese somit. Nach dem Übergang ist die Verbraucherleistung geringer als die eingespeiste und die Synchronmaschine beginnt zu beschleunigen. In Abbildung 6.7 ist der Vergleich zwischen der Drehzahl und der Leistung zu sehen. Es ist erkennbar, dass nach Abschaltung des speisenden Netzes die Synchronmaschine die Energieversorgung der Lastseite übernimmt.



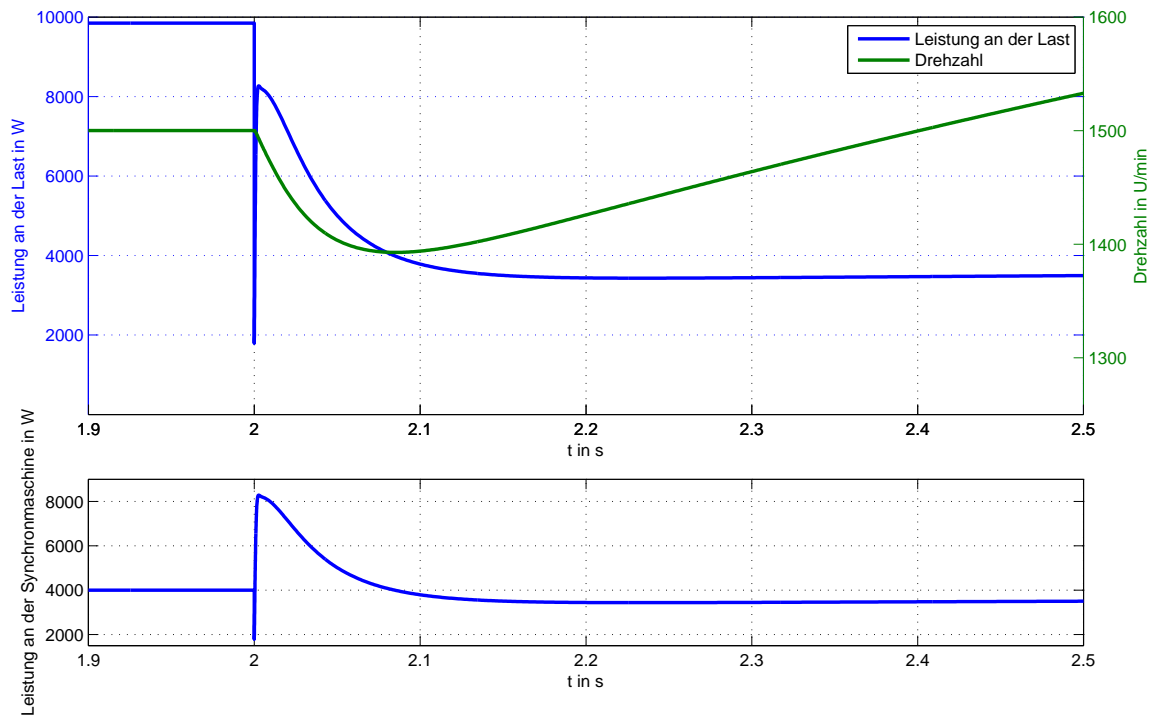


Abbildung 6.7: Bremsung der Synchronmaschine bei Leistungsanstieg

Da die Synchronmaschine mit konstanter Erregung betrieben wird (siehe Kapitel 4.5) und bei Abschaltung des speisenden Netzes keine Nachregelung erfolgt, verringert sich, wie vorher beschrieben, die Spannung im Netz. Zum Zeitpunkt  $t = 2.01$  hat die Synchronmaschine die Energieversorgung der Last vollständig übernommen. Wie aus der Abbildung 6.7 zu erkennen ist, steigt die gelieferte Leistung über die eingespeiste Leistung an. Der Anstieg der Leistung wird im Folgenden untersucht. Aus der Abbildung 6.5 ist erkennbar, dass sich der Polradwinkel einen stationären Endpunkt von  $42^\circ$  annähert. Für eine spätere Betrachtung werden aus Abbildung 6.6 und 6.7 einige Werte von Drehzahl, Spannung, Polradwinkel und Leistung in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Zeit	Spannung	Leistung	Drehzahl	Polradwinkel	Reaktanz
s	V	W	U/min	°	p.u.
1.95	230.9	4000	1500	19.00	0.21
2.01	207.7	7942	1470	31.34	0.26
2.03	184.9	6289	1427	33.44	0.30
2.07	153.1	4315	1393	33.73	0.50
2.10	143.5	3789	1394	33.61	0.66
2.20	136.8	3443	1426	33.80	1.20
2.40	137.1	3475	1500	34.04	1.77

Tabelle 6.1: Simulationswerte bei Abschaltung des speisenden Netzes

Unter Verwendung der Formeln aus Kapitel 5.5 ist es möglich die Netzkennlinien zu zeichnen. Die Formeln beschreiben jeweils einen stationären Arbeitspunkt. Unter der Annahme, dass sich die Generator-Klemmenspannung  $U$ , der Polradwinkel  $\vartheta$  sowie die Reaktanz  $X$  Funktionen der Zeit sind, werden die Formeln aus Kapitel 5.5 um die Zeitabhängigkeit erweitert.

$$P(t) = \frac{E \cdot U(t)}{X(t)} \sin(\vartheta(t)) \quad (6.9)$$

Die sich ändernde Reaktanz  $X(t)$  durchläuft, wie der Kurzschlussstrom der Synchronmaschine, die zeitlichen Phasen subtransient, transient und stationär. Durch die analytische Berechnung der Kurzschlussströme (siehe Kapitel 6.5) an der Synchronmaschine kann mit der Polradspannung auf die Reaktanz geschlossen werden.

$$X(t) = \frac{E}{I(t)} \quad (6.10)$$

Wird die Berechnung (Formel 6.10) durchgeführt, ergibt sich die zeitliche Abhängigkeit der Reaktanz. Abbildung 6.10 zeigt den Stoßkurzschlussstrom der Synchronmaschine, welcher für die Berechnung der Reaktanz  $X(t)$  herangezogen wurde. Die Reaktanzen der Leitungselemente sind bei der Berechnung noch berücksichtigt, sind aber gegenüber den Generatorreaktanzen vernachlässigbar. Abbildung 6.8 zeigt das Ergebnis der Berechnung. Wird diese Tatsache für die Berechnung der dynamischen Netzkennlinie herangezogen, so ergibt sich Abbildung 6.9. Aus der Abbildung 6.9 ist zu erkennen, dass im Moment der Abschaltung des speisenden Netzes sich die Leistung schlagartig verringert. Diese Verringerung tritt aufgrund der bereits beschriebenen "Spitze" (siehe Kapitel 6.1) und hat für die Betrachtung keine Rolle. Durch die Reduktion der Reaktanz (siehe Abbildung 6.8) ist die relative Änderung des Nenners aus Gleichung 6.9 schneller als jene des

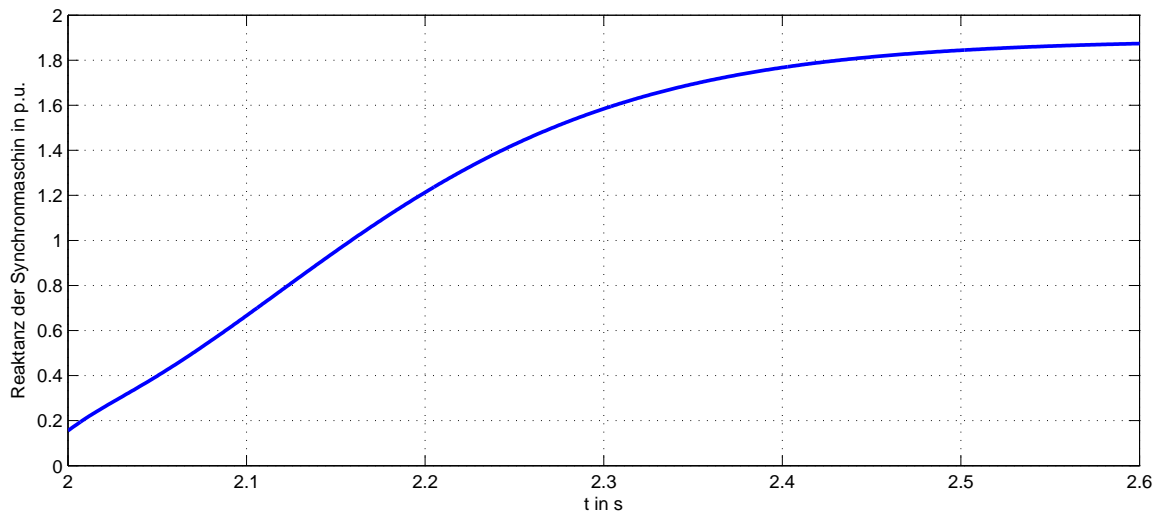


Abbildung 6.8: Zeitlicher Verlauf der Reaktanz der Synchronmaschine

Zählers. Dadurch steigt die Leistung in Abbildung 6.9 an und stimmt mit dem Wert aus Abbildung 6.7, unteres Bild, überein. Unter Betrachtung der Werte für die Reaktanz  $X(t)$  und der Leistung der Synchronmaschine aus Tabelle 6.1 ist das beschriebene Verhalten nachvollziehbar.

Aus der Abbildung 6.9 ist zu erkennen, dass vor und nach der Abschaltung des speisenden Netzes nicht mehr dieselbe Leistung zur Last transportiert wird. Anhand der Simulation kann die dynamische Stabilität der Synchronmaschine nachgewiesen werden. Zu beachten ist, dass beim Übergang in den neuen stationären Zustand, keine synchronen Verhältnisse mehr vorliegen, da zusammen mit der Drehzahl auch die Frequenz gestiegen ist. Bei der Berechnung der Netzkennlinien ist dieser Umstand bei der Reaktanzberechnung zu berücksichtigen.

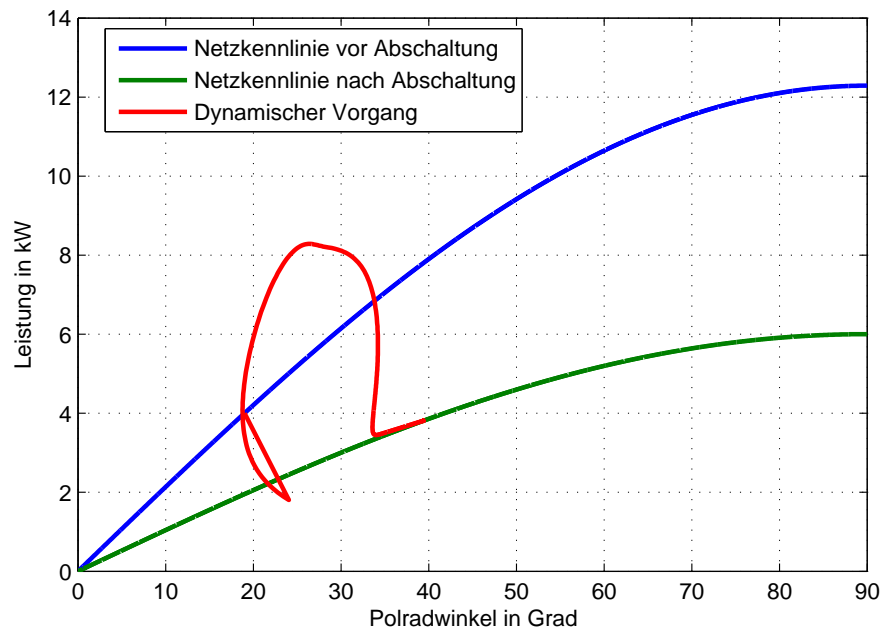


Abbildung 6.9: Übergang zwischen zwei stationären Betriebspunkten

## 6.2.4 Vergleich

Die analytische Berechnung der Phasenspannung und Drehzahl nach Abschaltung des speisenden Netzes, zeigen eine Übereinstimmung der Ergebnisse. Wie berechnet, beschleunigt die Synchronmaschine bis zu einer Drehzahl von ca. 2250 U/min. Der Einbruch der Spannung im Moment der Netztrennung, ist auf die sofortige Belastung der Synchronmaschine zurückzuführen. Diese Belastung ist an der sprunghaften Änderung des Polradwinkel aus Abbildung 6.5 zu erkennen.

## 6.3 Änderung des Belastungszustandes

### 6.3.1 Aufgabenstellung

Ausgehend von einem stationären Betriebspunkt, wird die Turbinenleistung  $P_m$  der Synchronmaschine sprunghaft verändert. Während der Änderung der mechanischen Leistung bleibt die Erregerspannung  $U_f$  konstant, und es findet keine Abschaltung des speisenden Netzes statt. In Abbildung 6.10 ist die verwendete Topologie zu sehen.

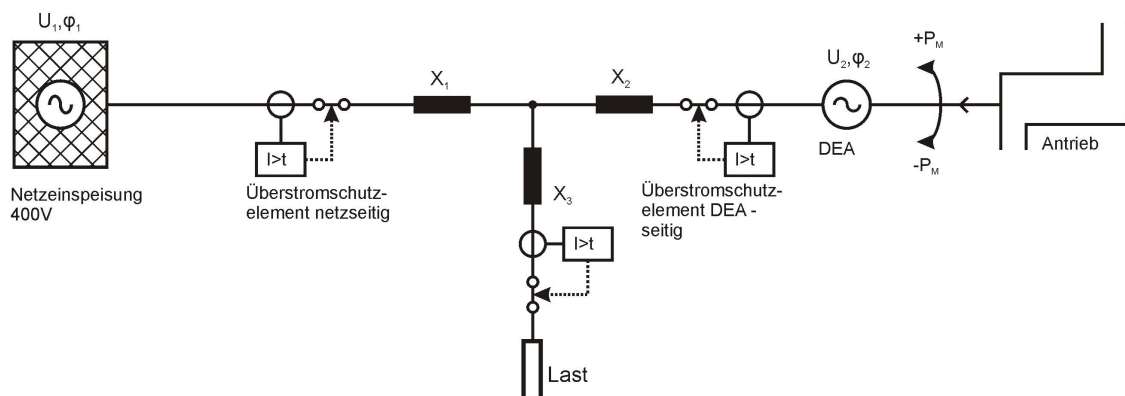


Abbildung 6.10: Änderung der Einspeiseleistung

Da die Synchronmaschine während der Änderung der mechanischen Leistung  $P_M$  nicht vom Netz getrennt wird, wird sie ihre synchrone Drehzahl  $\omega_s$  beibehalten. Solange die Änderung innerhalb gewisser Grenzen stattfindet, besteht die Möglichkeit, einen stationären Endpunkt zu erreichen. Wie aus der Theorie [2] bekannt ist, besitzen Vollpol- und Schenkelpollläufer unterschiedliche Stabilitätsbereiche. Beim Vollpolläufer herrscht bei einem Polradwinkel von  $90^\circ$  noch ein stabiler Betriebspunkt. Dies ist beim Schenkelpolläufer aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens in Längs- und Querrichtung nicht gegeben. Somit besitzt dieser einen maximalen Polradwinkel kleiner von  $90^\circ$ . Mit dem *Matlab/Simulink*® Modell wurden verschiedene Belastungsänderungen simuliert und untersucht.

### 6.3.2 Simulation

In Abbildung 6.11 ist das Ergebnis der Simulation mit unterschiedlicher Vorbelastung zu sehen. Die Leistung an der Welle der Synchronmaschine wird im Bereich zwischen -8 kW (Motorbetrieb) und 8 kW (Generatorbetrieb) in 1 kW Schritten variiert. Bei Erreichen eines stationären Betriebspunktes, wird aus der Simulation der Polradwinkel ermittelt und die Leistung über den Polradwinkel in Abbildung 6.11 aufgetragen. Anhand der Simulation ist zu erkennen, dass die Längs- und Querreaktanz unterschiedlich sind.

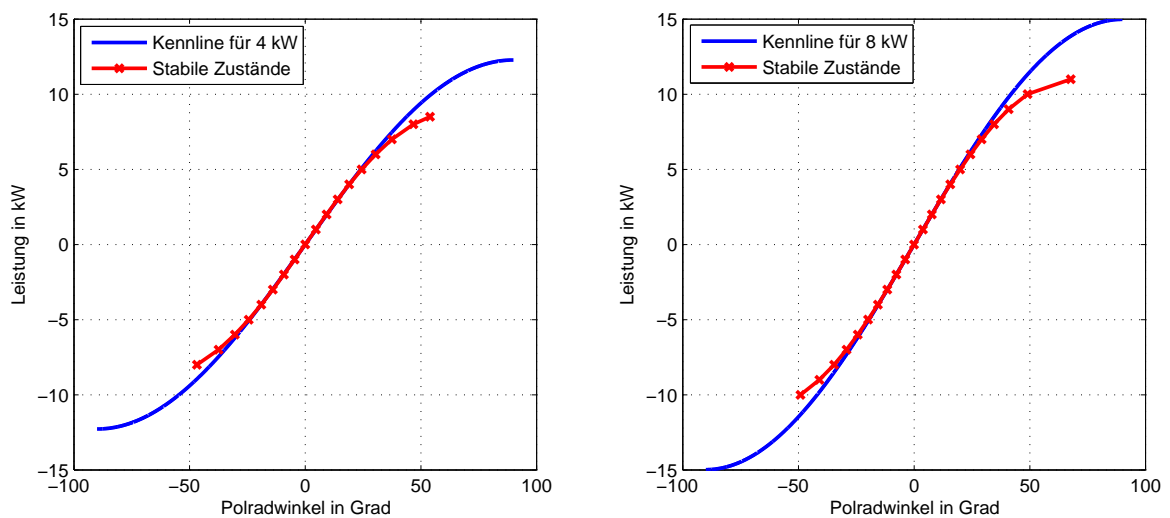


Abbildung 6.11: Stabilitätspunkte für eine Wellenleistung von 4 kW (links) und 8 kW (rechts)

Der zu Beginn des Kapitels 6.3 beschriebene Belastungsschritt erfolgt im Modell durch eine sprunghafte Erhöhung der mechanischen Leistung an der Welle der Synchronmaschine. Durch die Ändernde mechanische Belastung erfolgt ein Ausgleichsvorgang. Exemplarisch für den Übergang wird ein Belastungssprung von 4 kW (Startpunkt) auf 6 kW (Endpunkt) in Abbildung 6.12 dargestellt.

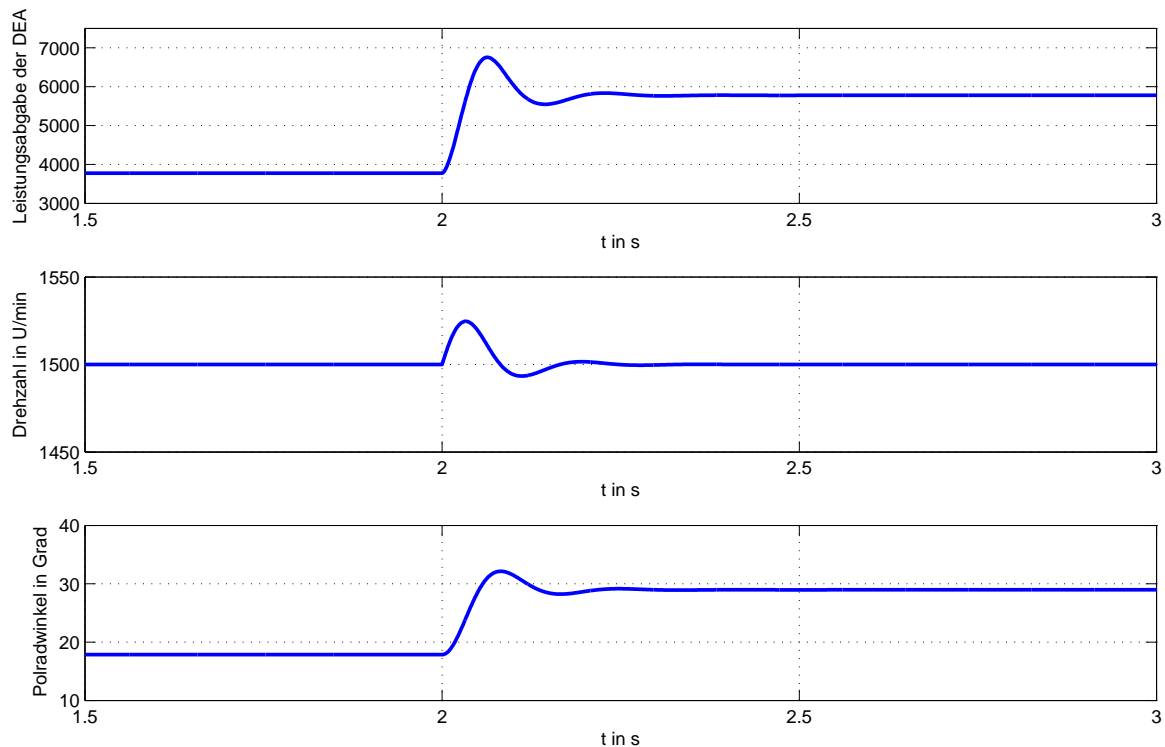


Abbildung 6.12: Änderung der mechanischen Belastung

Aus der Abbildung 6.12 ist zu erkennen, dass sich beim Übergang ein neuer stationärer Betriebspunkt bei 6 kW einstellt. Dadurch wird die Synchronmaschine kurz ausgelenkt und reagiert mit einer Abweichung der Drehzahl und synchronisiert sich wieder ans Netz. Am Anstieg des Polradwinkels ist die gesteigerte mechanische Belastung zu sehen.

### 6.3.3 Ergebnis

Das linke Diagramm in Abbildung 6.11 gilt für eine Synchronmaschine bei einer mechanischen Leistung von 4 kW und das rechte für eine mechanische Leistung von 8 kW. Tritt eine sprunghafte Änderung der Turbinenleistung auf und befindet sich die Änderung innerhalb gewisser Grenzen, herrscht ein stabiler Betriebspunkt, andernfalls ist ein Kippen die Folge. An den Ausläufern ist das charakteristische Verhalten des Schenkelpollläufers zu erkennen. Zusätzliche beschreiben die Kurven den möglichen Stabilitätsbereich. Anhand des Versuchs konnte die statische Stabilität der Synchronmaschine nachgewiesen werden.

## 6.4 Überstromschutzabschaltung der Last

### 6.4.1 Aufgabenstellung

Auf der Lastseite wird ein dreipoliger Fehler simuliert. Für diese Simulation wird die Annahme getroffen, dass das Schutzelement der Lastseite schneller reagiert als das netzseitige und der generatorseitige. Der Fehler wird, wie bei allen Simulationen beim Zeitpunkt  $t = 2$  s gestartet. Als Reaktionszeit für das Überstromschutzorgan wird eine Auslösezeit von 20 ms (z.B. bei Verwendung einer Sicherung) definiert. Für die Betrachtung wird Abbildung 6.14 verwendet.

### 6.4.2 Simulation

In Abbildung 6.13 ist die Spannung, Drehzahl und der Polradwinkel der der Synchronmaschine zu sehen.

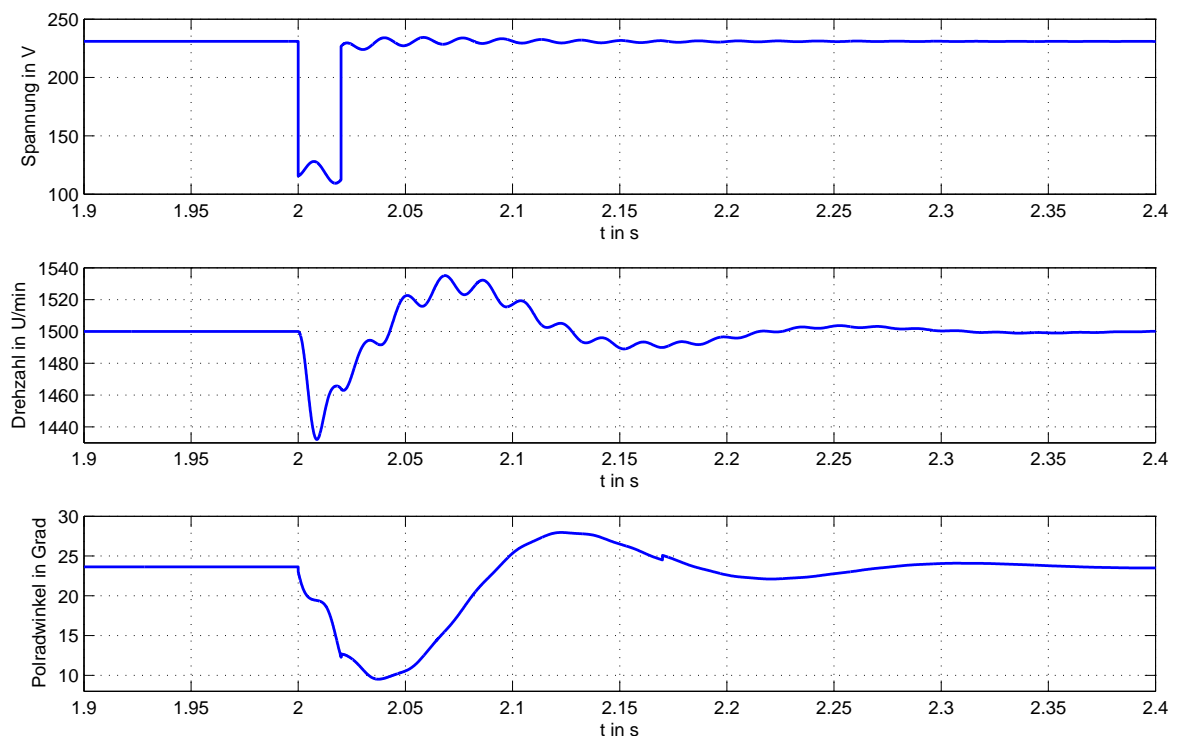


Abbildung 6.13: Abschaltung der Last infolge eines Fehlers

Die Erregerspannung  $U_f$  sowie die eingespeiste mechanische Leistung  $P_M$  werden während der Simulation nicht verändert.



### 6.4.3 Ergebnis

Wird die Last infolge eines dreipoligen Fehlers abgeschaltet, so speist die Synchronmaschine die von ihr gelieferte Leistung ins übergeordnete Netz zurück. Aus dem Verlauf (Abbildung 6.13) der Drehzahl ist zu erkennen, dass eine kurze Auslenkung aus dem eingestellten Betriebspunkt erfolgt. Da das speisende Netz nicht abgeschaltet wird, wird die Synchronmaschine sofort von diesem eingefangen.

## 6.5 Kurzschluss auf der Lastseite

### 6.5.1 Aufgabenstellung

Aus bisherigen Untersuchungen geht hervor, dass die Synchronmaschine ihre synchrone Drehzahl bei Netzfehlern verlieren kann.

In diesem Abschnitt werden verschiedene Fehlerszenarien, speziell der dreipolige Kurzschluss, auf der Lastseite angenommen und das Verhalten der Synchronmaschine analysiert. Für die folgenden Simulationen wird zweckmäßig der ohmsche Wirkwiderstand des Überstromschutzelements der Lastseite mit  $R = 1 \text{ m}\Omega$  festgelegt.

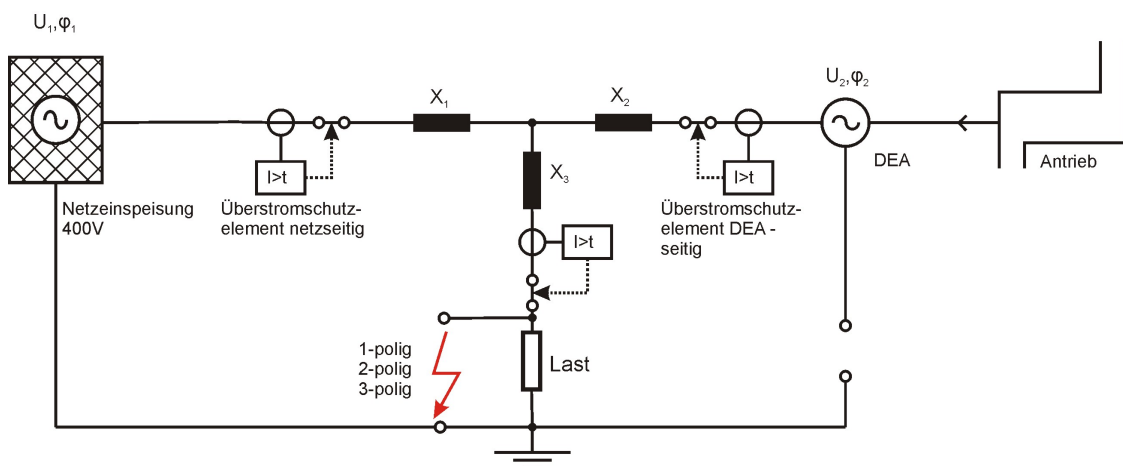


Abbildung 6.14: Netzaufbau mit verschiedenen Fehlerszenarien

Bei Fehlern auf der Lastseite stellt sich wiederum ein Ungleichgewicht zwischen der gelieferten und abgeführten Leistung ein. Es stellt sich die Frage, ob es im Fehlerfall für die Synchronmaschine günstiger ist, am Netz zu bleiben oder mit reduzierter Leistung auf einen Ersatzverbraucher zu speisen, um sich nach Fehlerklärung wieder ans Netz zu synchronisieren. Für eine sichere Fehlerklärung ist es notwendig, dass die Schutzeinrichtungen beider Quellen (siehe Abbildung 6.14) reagieren.

Für die folgenden Simulationen wird folgender Fehlerverlauf angenommen: Fehlereintritt bei  $t = 2 \text{ s}$  → Abschaltung der Netzeinspeisung durch das netzseitige Überstromschutzelement (z.B. Sicherung) nach 20 ms → Inselbildung → Netzwiederkehr zur Zeit  $t = 2.17 \text{ s}$  (z.B. spezielle Automatische Wiedereinschaltung - AWE). Für diesen Fall wird die Berechnung mit den symmetrischen Komponenten durchgeführt, um eine Aussage über das Verhalten der Synchronmaschine zu erhalten. Dabei erfolgt eine Berechnung

des Grundzustandes sowie des Fehlerfalls.

## 6.5.2 Berechnung

Für die Berechnung der gegebenen Aufgabenstellung werden die Formeln aus Kapitel 5.4 und 5.1 verwendet.

### 6.5.2.1 Berechnung der Polradspannungen

Für die Berechnung der Polradspannungen werden die in per Unit angegebenen Reaktanzen (siehe Tabelle 4.3) mit der Beziehung 6.11 in  $\Omega$ -Werte umgerechnet.

$$X = x_{(p.u.)} \frac{U^2}{S_N} \quad (6.11)$$

$$X_d = 1.8 \frac{400^2}{8100} = 35.55 \Omega \quad (6.12)$$

$$X_{d'} = 0.184 \frac{400^2}{8100} = 3.63 \Omega \quad (6.13)$$

$$X_{d''} = 0.115 \frac{400^2}{8100} = 2.27 \Omega \quad (6.14)$$

$$(6.15)$$

Der Winkel zwischen Klemmenspannung und Strangstrom ergibt sich aus dem Verhältnis von  $X$  zu  $R$  der Last.

$$\varphi = \arctan \frac{X_{Last}}{R_{Last}} = \arctan \frac{8}{16} = 26.56^\circ \quad (6.16)$$

Die wirksamen Polradspannungen errechnen sich nach Kapitel 5.4 wie folgt:

$$\underline{E} = \underline{U}_1 + jX_d \underline{I}_1 = 230.91 + j35.55 \cdot 6.486 e^{-j26.56^\circ} = 392.61 e^{j31.69^\circ} V \quad (6.17)$$

$$\underline{E}' = \underline{U}_1 + jX_{d'} \underline{I}_1 = 230.91 + j3.63 \cdot 6.486 e^{-j26.56^\circ} = 242.4 e^{j4.99^\circ} V \quad (6.18)$$

$$\underline{E}'' = \underline{U}_1 + jX_{d''} \underline{I}_1 = 230.91 + j2.27 \cdot 6.486 e^{-j26.56^\circ} = 237.89 e^{j3.17^\circ} V \quad (6.19)$$

Nach der Berechnung der Polradspannungen kann das tatsächliche Zeigerdiagramm erstellt werden. Abbildung 6.15 zeigt das Zeigerdiagramm der Polradspannungen mit den jeweils wirksamen Reaktanzen.

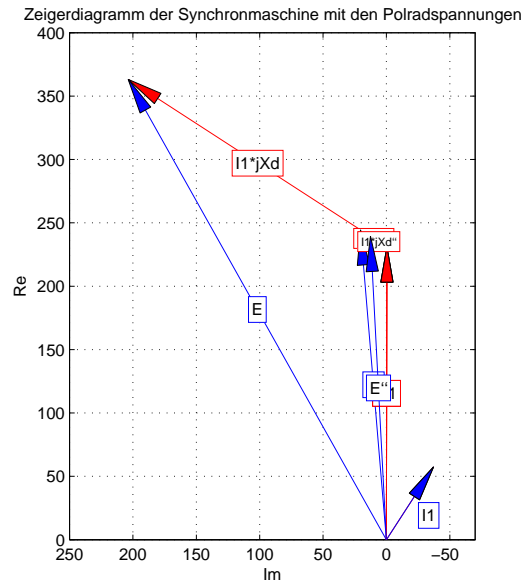


Abbildung 6.15: Zeigerdiagramm der unterschiedlichen Polradspannungen

### 6.5.2.2 Berechnung der Kurzschlussströme

Nachdem die Polradspannungen für die unterschiedlichen Reaktanzen berechnet wurden, können die dazugehörigen Kurzschlussströme berechnet werden. Als Gesamtimpedanz zwischen Quelle und dem Kurzschluss ergibt sich

$$\underline{Z}_{ges} = jX + jX_2 + jX_3 + R_S + R_{Fehler} \quad (6.20)$$

wobei für X die unterschiedlichen Reaktanzwerte (siehe 6.12, 6.13 und 6.14) einzusetzen sind.

$$\underline{Z}_{ges} = j35.55 + j0.16 + j0.16 + 0.001 = 35.88e^{j89.99^\circ} \Omega \quad (6.21)$$

$$\underline{Z}_{ges'} = j3.63 + j0.16 + j0.16 + 0.001 = 3.95e^{89.98^\circ} \Omega \quad (6.22)$$

$$\underline{Z}_{ges''} = j2.27 + j0.16 + j0.16 + 0.001 = 2.59e^{89.97^\circ} \Omega \quad (6.23)$$

Aus der Berechnung der Gesamtimpedanz geht hervor, dass die Reaktanzen der Synchronmaschine gegenüber den restlichen Netzkomponenten dominant sind. Durch Ver-

wendung des ohmschen Gesetzes können die Kurzschlussströme berechnet werden.

$$\underline{I}_K = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{ges}} = \frac{392.61e^{j31.69^\circ} V}{35.88e^{j89.99^\circ} \Omega} = 10.94e^{-j58.30^\circ} \quad (6.24)$$

$$\underline{I}_{K'} = \frac{\underline{E}'}{\underline{Z}_{ges'}} = \frac{242.4e^{j4.99^\circ} V}{3.95e^{89.98^\circ} \Omega} = 61.30e^{-j85.00^\circ} \quad (6.25)$$

$$\underline{I}_{K''} = \frac{\underline{E}''}{\underline{Z}_{ges''}} = \frac{237.89e^{j3.17^\circ} V}{2.59e^{89.97^\circ} \Omega} = 91.79e^{-j86.80^\circ} \quad (6.26)$$

Für den Gesamtkurzschlussstrom der Synchronmaschine werden die einzelnen Stromkomponenten in Gleichung 5.35 eingesetzt. In Abbildung 6.16 ist der berechnete Kurzschlussstrom anhand der Formeln zu sehen.

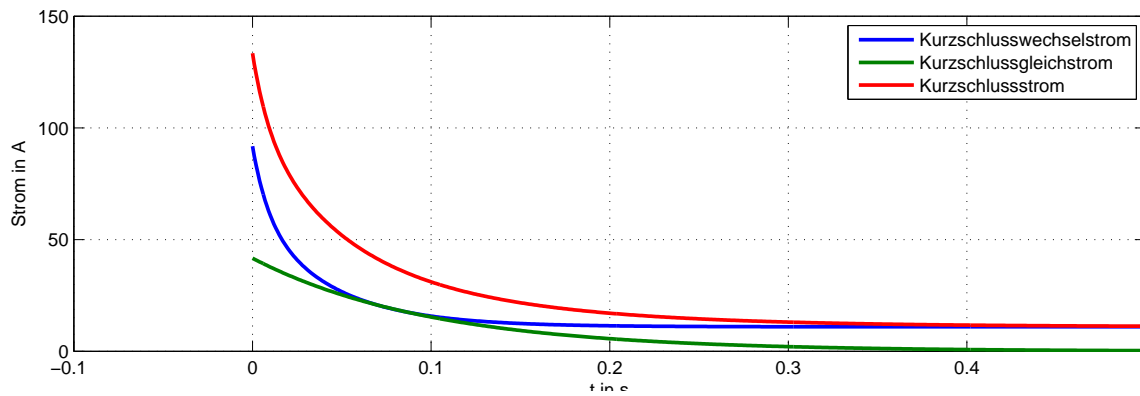


Abbildung 6.16: Berechneter Kurzschlussstrom

### 6.5.2.3 Berechnung der umgesetzten Leistung

Mit den erhaltenen Kurzschlussströmen kann die an den Wirkwiderstandselementen umgesetzte Leistung ermittelt werden. Während der subtransiente und transiente Strom annähernd vernachlässigbar ist, setzt der stationäre Strom die eingespeiste Energie in Wärme um und bremst somit die Synchronmaschine. Als Wirkwiderstandswert  $R$  wird der willkürlich angenommene ohmsche Widerstand ( $1 \text{ m}\Omega$ ) des Sicherungsautomaten verwendet.

$$P_{verbrauch} = 3|I_K|^2 R = 3 \cdot (10.94 \text{ A})^2 \cdot 0.001 \Omega = 0.359 \text{ W} \quad (6.27)$$

Da die mechanische eingespeiste Leistung  $P_M$   $4 \text{ kW}$  beträgt und der stationäre Fehlerstrom weniger als  $1 \text{ W}$  verbraucht, ist mit einer ungebremsten Beschleunigung zu rechnen.

Bei der Berechnung der Bremsleistung wurde der stationäre Fehlerstrom betrachtet und der transiente bzw. subtransiente Kurzschlussstrom außer Acht gelassen. Werden alle Stromkomponenten berücksichtigt, ergibt sich für die Leistung (Abbildung 6.17) folgender Verlauf.

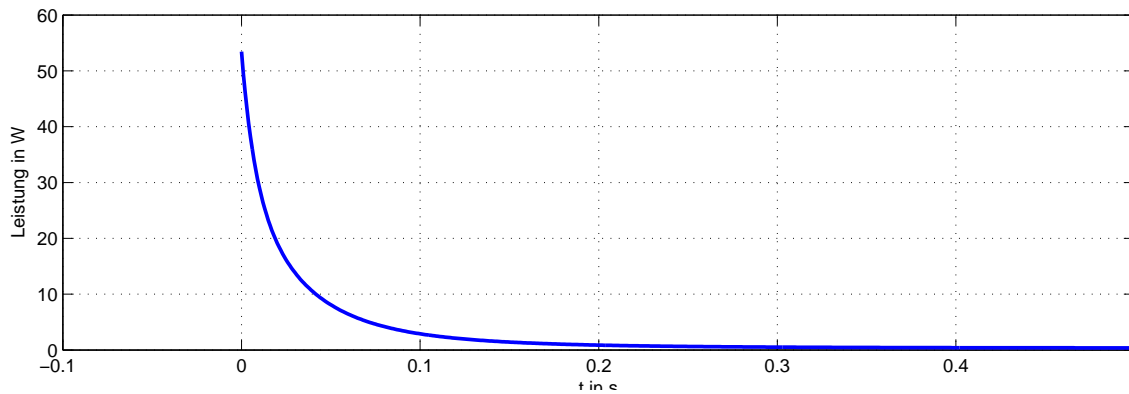


Abbildung 6.17: Berechneter Verlauf der Leistung

Hinweis: <sup>1</sup>

#### 6.5.2.4 Berechnung der verbleibenden Restspannung

Bei unregelter Erregerspannung  $U_f$  bricht die Klemmenspannung  $U$  ein und stellt sich auf einen Wert von, der sich für den stationären Fehlerstrom aus

$$U_1 = |I_K| Z_{Fehler} = 10.94 A \cdot (0.001 + j0.32) \Omega = 3.41 V \quad (6.28)$$

errechnet, ein. Für die Fehlerimpedanz  $Z_{Fehler}$  wird der ohmsche Widerstand des Sicherungsautomaten sowie die Leitungsimpedanzen von jeweils  $j0.16 \Omega$  eingesetzt.

#### 6.5.2.5 Berechnung der Drehzahl infolge des Fehlers

Da die stationär umgesetzte Leistung bekannt ist, kann die maximale Drehzahl unter Zuhilfenahme der Formeln aus Kapitel 5.1 berechnet werden. Wird die Dämpfung der Synchronmaschine vernachlässigt, ergibt sich nach der gewählten Simulationsdauer von acht Sekunden eine maximale Drehzahl  $\omega_{maxoD}$  von ca. 8000 U/min. Wird die Dämpfung berücksichtigt ergibt sich eine maximale Drehzahl  $\omega_{maxoD}$  von ca. 5700 U/min. In Tabelle 6.2 sind die Drehzahlen zu sehen.

<sup>1</sup>Quadratische Abhängigkeit der Leistung vom Strom. Die umgesetzt Leistung an der Fehlerstelle wird zu Null.

Vernachlässigung der Dämpfung	Berücksichtigung der Dämpfung
$\omega_{maxoD}$	$\omega_{maxmD}$
U/min	U/min
8000	5700

Tabelle 6.2: Vergleich der maximalen Drehzahl bei unterschiedlichen Annahmen nach einer Simulationsdauer von acht Sekunden

Zur Erinnerung wird erwähnt, dass das Überstromschutzelement der Synchronmaschine annahmegemäß nicht reagiert. Die berechneten Drehzahlen sind für eine Simulationsdauer von acht Sekunden berechnet worden.

### 6.5.3 Simulation

In Abbildung 6.18 ist die Drehzahl und der Polradwinkel bei einem dreipoligen Fehler zu sehen. Im Zeitpunkt des Fehlerauftritts  $t = 2$  s speisen beide Quellen auf den Kurzschluss ein. In der Zeit zwischen  $t = 2$  s und  $t = 2.02$  s erfolgt keine Reaktion des netzseitigen Überstromschutzelements und die Spannung bricht auf der Lastseite nicht vollständig zusammen. Unter der getroffenen Annahme der Reaktionszeit des Schutzelements mit 20 ms, speist ab dem Zeitpunkt  $t > 2.02$  s die Synchronmaschine weiterhin auf den Fehler ein. Ab diesem Zeitpunkt ist mit einer Beschleunigung der Synchronmaschine zu rechnen, da das synchronisierende Moment fehlt. Ab dem Zeitpunkt  $t = 2.17$  s (willkürliche Annahme) wird der Fehler als geklärt angenommen und eine Netzsynchronisation kann erfolgen. Aufgrund der willkürlich angenommen Fehlerdauer von 150 ms besitzt die Synchronmaschine nach Fehlerklärung eine Drehzahl von 1500 U/min und eine Synchronisierung ans Netz kann erfolgen. Aus dem Verlauf der Drehzahl kann entnommen werden, dass die eine erfolgreiche Synchronisierung stattgefunden hat. Kehrt das speisende Netz zurück, so wird die Synchronmaschine davon "eingefangen" und erreicht ihre synchrone Drehzahl. Wie weit dieses Verhalten verallgemeinert werden kann, ist Gegenstand weiterführender Untersuchungen. In diesem Fall spielen Fehlerdauer, einen Selbstregelfekt der Last und Trägheitskonstante der Synchronmaschine zusammen. Nach  $t > 2.18$  s versorgen wieder beide Quellen (Netz und Synchronmaschine) die Last mit Energie.

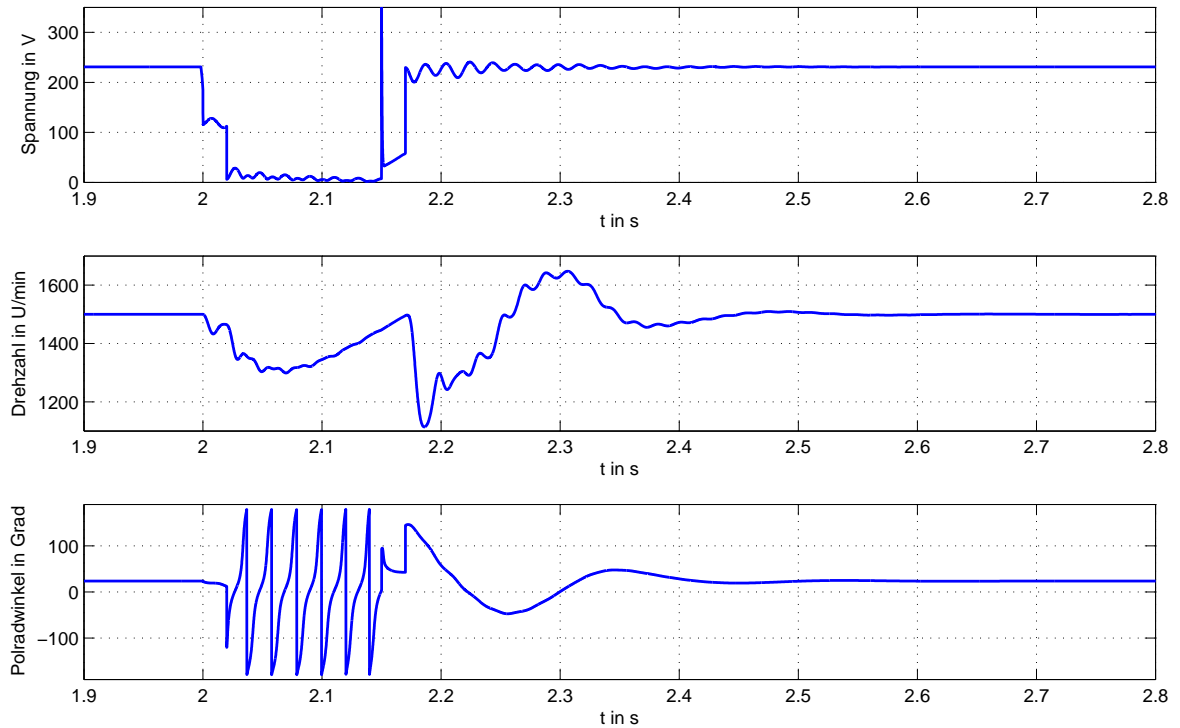


Abbildung 6.18: Dreipoliger Kurzschluss

Wird die Annahme getroffen, dass die Synchronisierung ans Netz fehlschlägt und der Kurzschluss nicht abgeschaltet wird, speist die Synchronmaschine weiterhin auf den Fehler ein. Der Kurzschlussstrom unterliegt aufgrund der unterschiedlich wirksamen Reaktanzen einem zeitlichen Verlauf. Abbildung 6.19 zeigt den simulierten Kurzschlussstrom der Synchronmaschine mit der getroffenen Annahme.



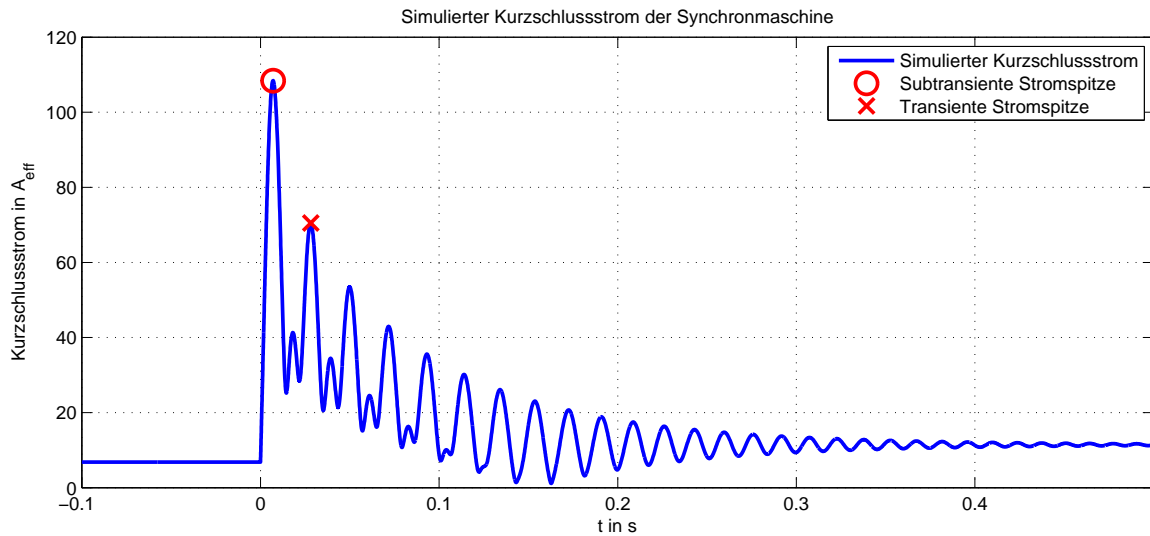


Abbildung 6.19: Verlauf des Kurzschlussstromes

Bei Fehlerauftritt liefern beide Quellen einen Beitrag zum Kurzschlussstrom. Der Kurzschlussstrom des Netzes ist gegenüber dem der Synchronmaschine ausgeprägter. Der Grund dafür liegt in der Zeitdauer des auftretenden Fehlerstromes. Da das übergeordnete Netz durch die Vermaschung unendlich viel Leistung zu Verfügung stellt, klingt der Fehlerstrom des Netzes nicht ab und kann sicher und selektiv von einem Sicherungsautomaten abgeschaltet werden.

Betrachtet man in Abbildung 6.19 den Wert des subtransienten und transienten Fehlerstromes, so ist eindeutig, dass ein entsprechendes Überstromschutzorgan diesen Wert erkennen müsste, wenn der Fehlerstrom eine gewisse Zeit lang über das Schutzelement fließt. Da der Kurzschlussstrom laut [1] durch zwei Exponentialkurven eingehüllt wird, ist die Zeitdauer des transienten und subtransienten Kurzschlussstromes für eine Abschaltung durch eine Überstromschutzorgan unter Umständen zu kurz. Der stationäre Fehlerstrom der Synchronmaschine wird durch die stationäre Reaktanz  $x_d$  bestimmt.

Unter der getroffenen Annahme, dass eine Netzsynchronisierung nicht stattfindet, zeigt die umgesetzte Leistung an den Wirkleistungsverbrauchern den Verlauf aus Abbildung 6.20.<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Quadratische Abhängigkeit der Leistung vom Strom

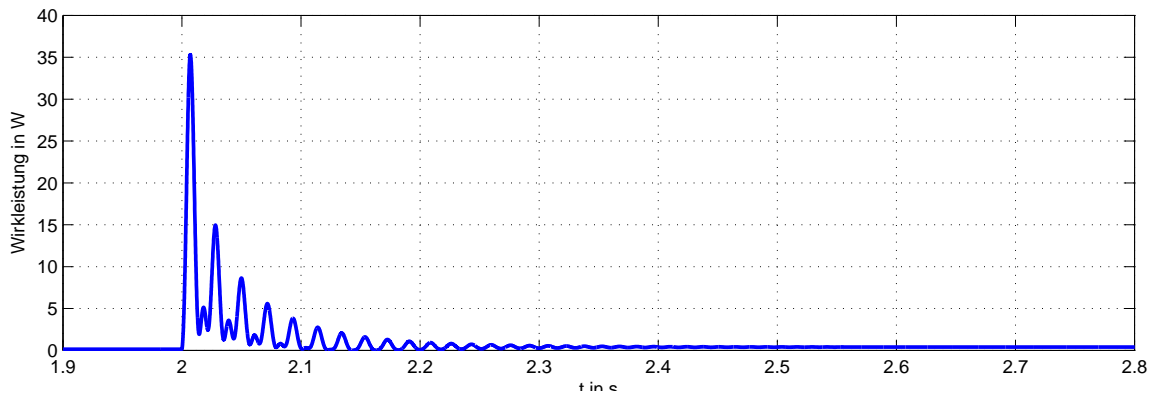


Abbildung 6.20: Leistungsverlauf infolge eines Fehlers

### 6.5.4 Vergleich

Wird der simulierte Kurzschlussstrom der Synchronmaschine aus Abbildung 6.19 mit dem berechneten Kurzschlussstrom anhand der Formeln aus Kapitel 5.4 bzw. der Berechnung aus Kapitel 6.5.2.2 miteinander verglichen, ergibt sich eine Deckung zwischen Simulation und Berechnung. Zusätzlich wird in Abbildung 6.21 die Spannung ausgegeben.

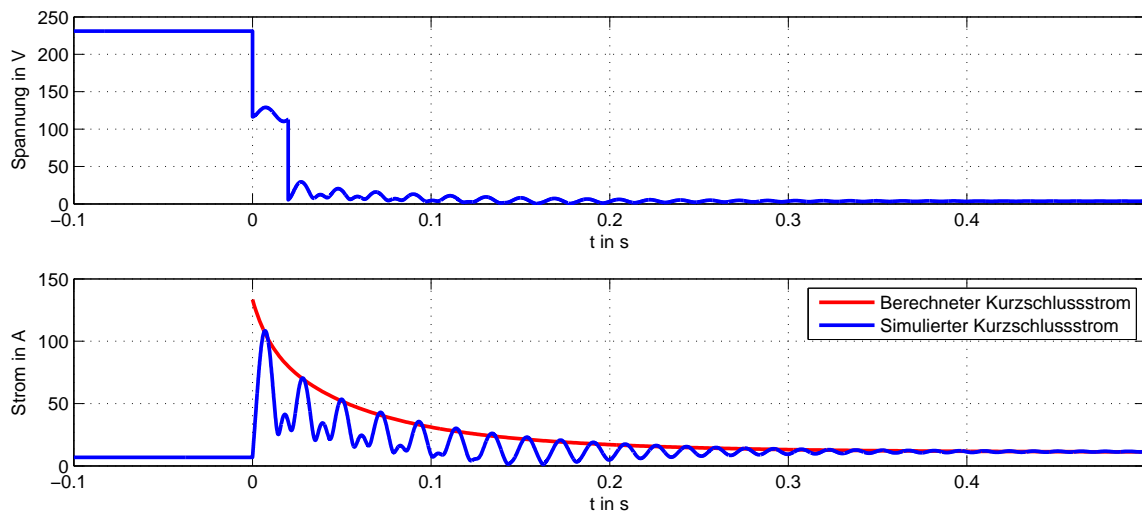


Abbildung 6.21: Simulierter und berechneter Kurzschlussstrom der Synchronmaschine

Abbildung 6.22 zeigt den Vergleich zwischen der simulierten Leistung aus Kapitel 6.5.3 mit dem berechneten Wert aus Kapitel 6.5.2.3.

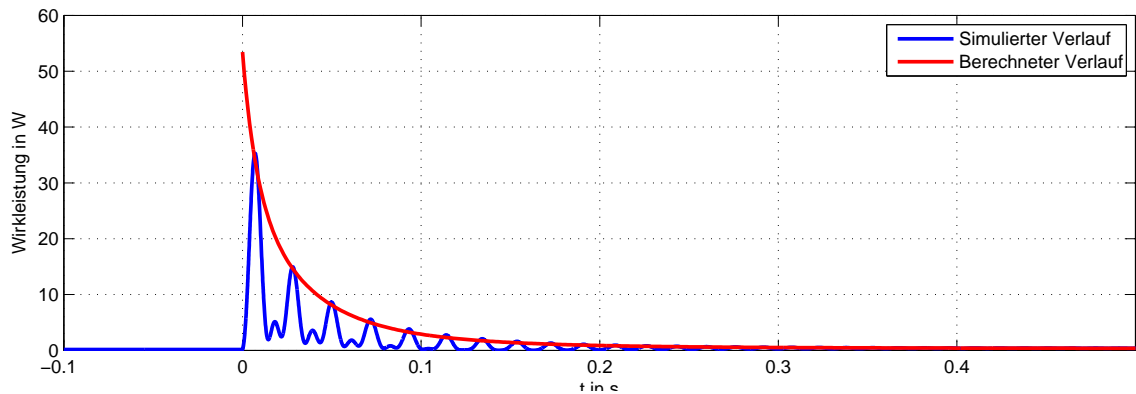


Abbildung 6.22: Vergleich zwischen simuliertem und berechnetem Leistungsverlauf

Werden die berechneten maximalen Drehzahlen (mit und ohne Berücksichtigung der Dämpfung) aus Kapitel 6.5.2.5 mit den simulierten verglichen, ist in Abbildung 6.23 zu erkennen, dass Berechnung (Kapitel 6.5.2.5) und die vorliegende Simulation gut übereinstimmen.

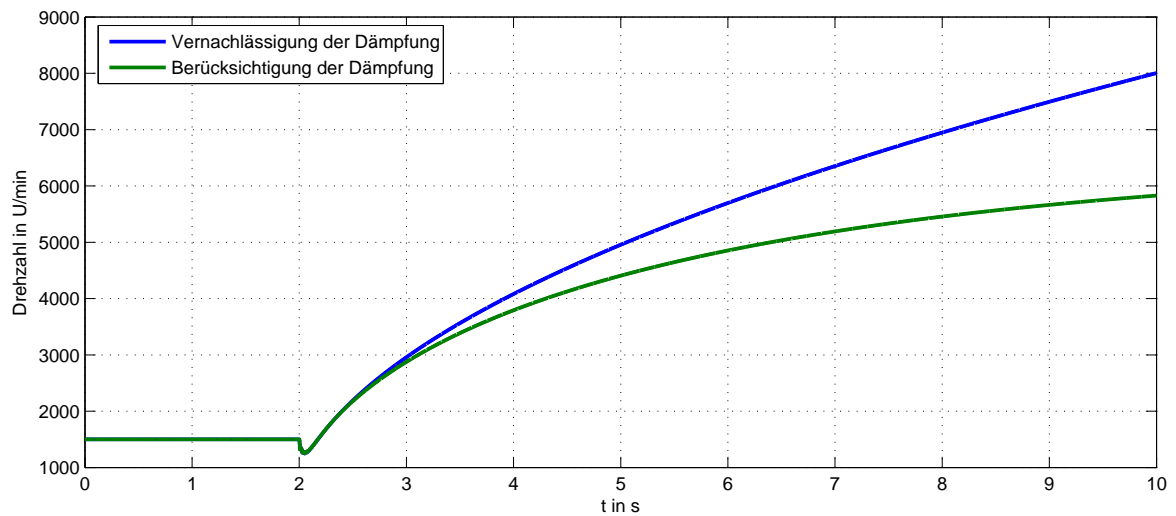


Abbildung 6.23: Drehzahlverlauf mit und ohne Dämpfung

## 6.6 Zusammenfassung

Tritt ein Kurzschluss auf der Lastseite auf, so verliert die Synchronmaschine ihre synchrone Drehzahl  $\omega_s$  und unterliegt je nach Leistungsdifferenz einer Beschleunigung oder Verzögerung des Polrades. Da in den Simulationen die Annahme getroffen wurde, dass alle ohmschen Wirkleistungsverbraucher vernachlässigt worden sind, wird ein schlechteres Verhalten dargestellt als tatsächlich auftritt. Dadurch wird von der eingespeisten Wirkleistung weniger verbraucht und es liegt mehr Energie für die Beschleunigung bzw. Verzögerung vor. Unter Berücksichtigung realer typischer Leistungswerte (ohmscher Widerstand dominant gegenüber dem induktiven Widerstand) für eine Niederspannungsfreileitung, so wird an jedem Wirkleistungselement die eingespeiste Leistung verbraucht. Die auftretende Beschleunigung oder Verzögerung ist in diesem Fall nicht so ausgeprägt.

Um den Beschleunigungsvorgang der Synchronmaschine unter Kontrolle zu halten gibt es mehrere Möglichkeiten welche, die im Folgenden beschrieben werden.

### 6.6.1 Verwendung eines Drehzahlwächters

Der Drehzahlwächter kontrolliert die Drehzahl bzw. Umdrehungen der Synchronmaschine und reagiert, wenn ein definiertes Toleranzband unter- bzw. überschritten wird. Ist das der Fall, greift dieser in die Regelung der Turbinenleistung ein und versucht einen stabilen Arbeitspunkt zu erreichen. Diese Möglichkeit bietet den Vorteil, dass die Synchronmaschine nach Fehlerklärung sofort wieder ans Netz synchronisiert werden kann. Komplexer ist das Verhalten bei Maschinen mit großen Schwungmassen. Dort ist es von Vorteil, wenn in die Regelung eingegriffen werden kann, da der Synchronisier- und Hochlaufvorgang längere Zeitdauer in Anspruch nimmt.

### 6.6.2 Zuschalten von Wirkleistungsverbrauchern

Eine weitere Möglichkeit, um einen Drehzahlanstieg zu steuern ist das Zuschalten von ohmschen Widerständen, welche die elektrisch gelieferte Leistung der Synchronmaschine verbrauchen. Das Zuschalten kann in Abhängigkeit des Drehzahlanstieges erfolgen und die Maschine kann unter Kontrolle gehalten werden. Ist die Regelung so aufgebaut, dass die ohmschen Verbraucher vergrößert und verkleinert werden können, kann auch bei einer Drehzahlabenkung eingegriffen werden. Somit kann die überschüssige Wirkleistung, welche das Polrad beschleunigen würde in Verlustwärme im zugeschalteten Bremswiderstand umgewandelt werden.

### 6.6.3 Reduktion der Einspeiseleistung

Das Polrad der Synchronmaschine kann nur beschleunigt werden, wenn die Leistungsbilanz an der Synchronmaschine nicht ausgeglichen ist - siehe Gleichung 5.11. Durch Messung der abgegebenen Leistung, kann die mechanisch eingespeiste Leistung ständig angepasst werden und ein beschleunigen oder bremsen des Polrades vermieden werden.

## 7 Labormesskonzept und -aufbau

Um die bereits erhaltenen Erkenntnisse über das Verhalten einer Synchronmaschine im Niederspannungsnetz zu bestätigen, sollen Versuche anhand der im Netzmodell vorhandenen Maschine durchgeführt werden. Um eine genaue Analyse zu erhalten, sind im Vorhinein die Daten des Netzmodells und die Parameter der verwendeten Geräte zu erheben. Zu untersuchen ist

- die Synchronmaschine,
- der Transformator,
- die Leitungsimpedanzen,
- die Innenimpedanz von Netz und Synchronmaschine.

Der Netzaufbau ist in Abbildung 7.1 zu sehen.

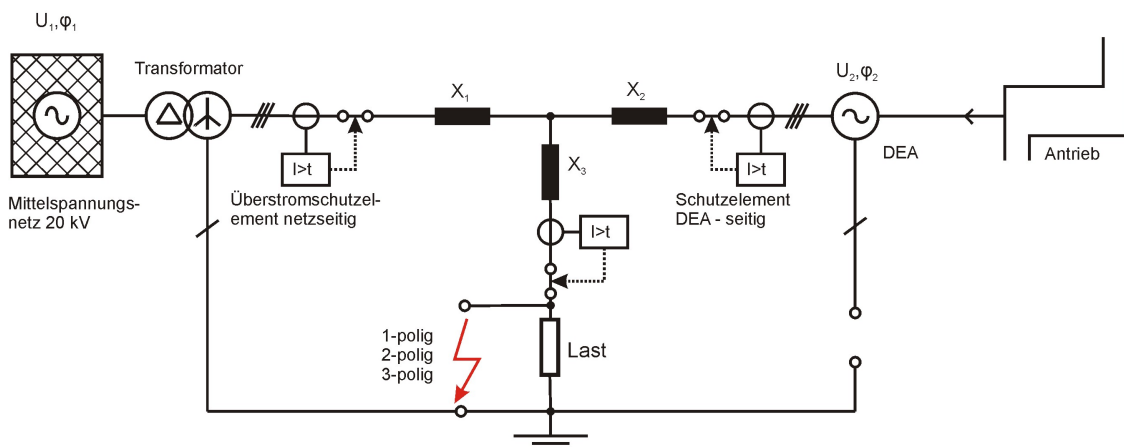


Abbildung 7.1: Messaufbau im Netzmodell - Prinzipdarstellung

Aus der Abbildung 7.1 geht hervor, dass für eine Aussage über das Verhalten im Fehlerfall alle Parameter des Netzmodells bekannt sein sollten. Als Netzeinspeisung wird der vorhandene 400-V "Netzausgang" im Netzmodell verwendet, wobei als Kurzschlussreaktanz die Impedanz des Trenntransformators verwendet wird. Durch diese Maßnahme

können die Kurzschlussströme unter Kontrolle gehalten werden. Abbildung 7.2 zeigt den zu dimensionierenden dreiphasigen Messaufbau.

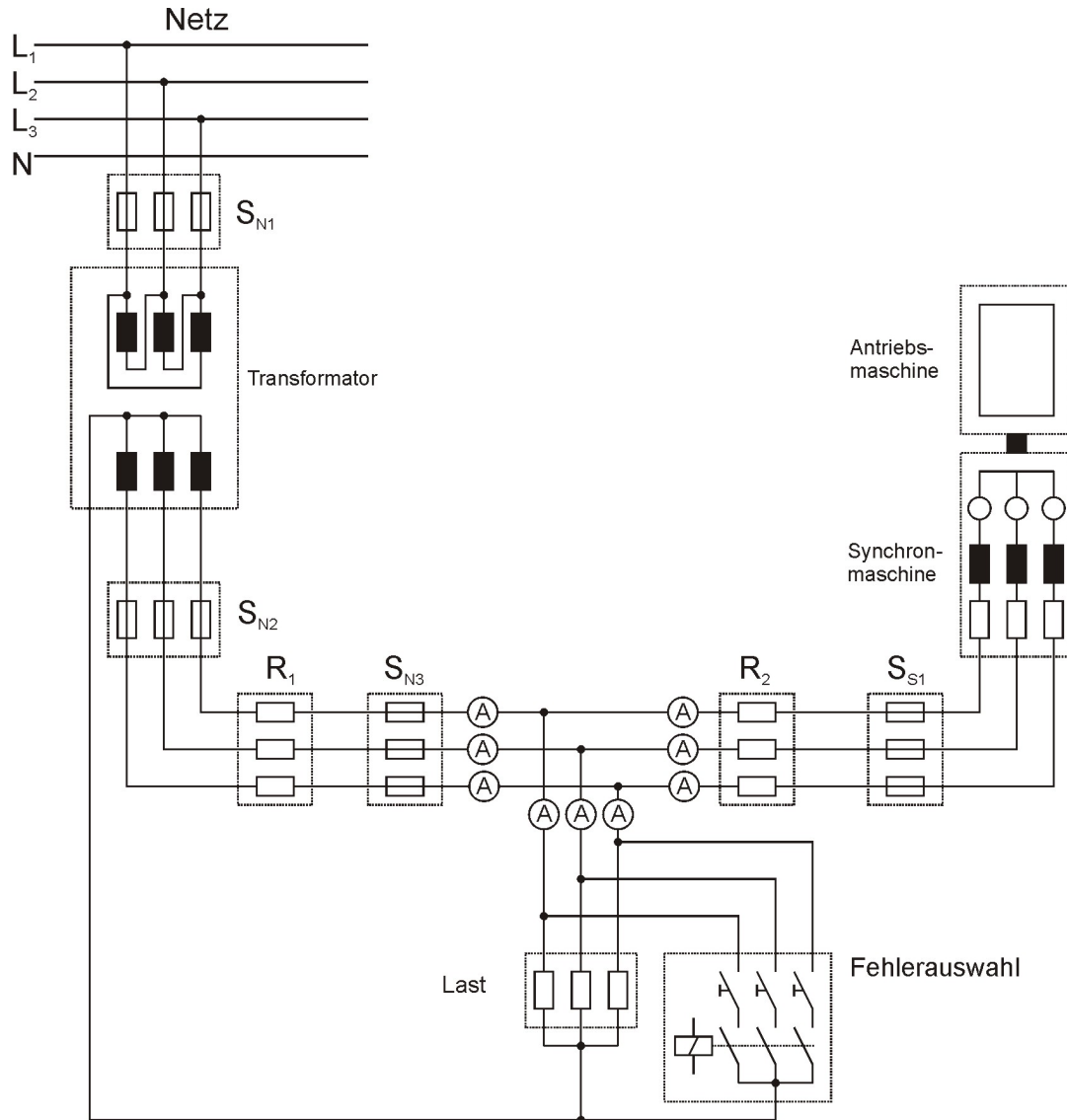


Abbildung 7.2: Dreiphasiger Labormessaufbau

Zusätzlich zu den Leitungselementen sind ausreichend Sicherungsautomaten inkludiert, um einen sicheren Laborbetrieb zu gewährleisten. Damit am Netzmodell kein Schaden entsteht, werden bei den ersten Messversuchen anstelle des Netzmodells Widerstandselemente verwendet. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten betrachtet.

## 7.1 Synchronmaschine

Um das Verhalten der Synchronmaschine zu beschreiben, ist die Kenntnis von den elektrischen sowie den mechanischen Parameter von Bedeutung.

### 7.1.1 Ermittlung der elektrischen Größen

Als dezentraler Einspeiser fungiert, wie in den Simulationen, die Synchronmaschine ( $S_N = 1 \text{ kVA}$ ) im Netzmodell. Diese wird über eine gekoppelte Antriebsmaschine auf Drehzahl gehalten. Da diese Synchronmaschine eine Leistung von  $0.8 \text{ kW}$  aufweist, sind die Werte für die transiente und subtransiente Reaktanz vernachlässigbar. Die elektrischen Parameter können vom Typenschild bzw. vom Datenblatt abgelesen werden. Die Nenndaten der Synchronmaschine sind in Tabelle 7.1 ersichtlich.

Typ	Wert	Einheit	Bemerkung
Leistung P	0.8	kW	Typenschild
Nennspannung $U_N$	400/230	V	Typenschild
Nennstrom $I_N$	1.52/2.66	A	Typenschild
Frequenz $f_N$	50	Hz	Typenschild
Leistungsfaktor $\cos\varphi$	0.8-1-0.8	-	Typenschild
Drehzahl n	1500	$\text{min}^{-1}$	Typenschild
Ständerwiderstand $R_S$	10	$\Omega$	Messung
Stationäre Reaktanz $x_d$	2.2	p.u.	Datenblatt
Transiente Reaktanz $x_d'$	0.65	p.u.	Datenblatt
Subtransiente Reaktanz $x_d''$	kA	p.u.	-
Polpaarzahl p	2	-	Datenblatt

Tabelle 7.1: Nenndaten der Synchronmaschine

### 7.1.2 Ermittlung der mechanischen Größen

Für die Bestimmung des Trägheitsmomentes der Synchronmaschine gibt es mehrere Ansätze. Einerseits kann eine messtechnische Ermittlung durch einen Beschleunigungsversuch bzw. Auslaufversuch und andererseits durch die rechnerische Ermittlung des Rotorzylinders erfolgen. In dieser Arbeit wurde das Trägheitsmoment sowie die Anlaufzeitkonstante rechnerisch ermittelt - siehe 7.1.3.2.



## 7.1.3 Berechnungen an der Synchronmaschine

### 7.1.3.1 Kurzschlussströme

Die Berechnung der Kurzschlussströme der Synchronmaschine erfolgt in Kapitel 7.8.

### 7.1.3.2 Abschätzung der Anlaufzeitkonstante

In der Literatur wird als zusätzlicher Maschinenparameter die Anlaufzeitkonstante  $T_J$  angegeben. Diese Zeitkonstante beschreibt laut [14] jene Zeit, in der der Maschinensatz vom Stillstand mit konstantem Nenn-Antriebsmoment ohne Belastung auf Nenndrehzahl beschleunigt. Anstatt der Anlaufzeitkonstante  $T_J$  wird die oft die normierte Trägheitskonstante  $H$  verwendet, wobei als Zusammenhang zwischen den Größen

$$H = \frac{1}{2}T_J \quad (7.1)$$

gilt.

Wird der Maschinensatz als Zylinder angesehen, so besitzt dieser ein Trägheitsmoment, welches sich aus dem Aufbau errechnen lässt. Für den Aufbau werden folgende Querschnitte und Längen abgeschätzt. Für die spezifische Dichte wird ein Mittelwert von Kupfer und Stahl gewählt ( $\rho = 8.3g/cm^3$ ).

Parameter	Synchronmaschine (SM)	Antriebsmaschine (AM)
Länge	18 cm	15 cm
Durchmesser	8 cm	7cm

Tabelle 7.2: Abschätzung des Maschinensatzes

Das Trägheitsmoment kann durch die in der Literatur angegebenen Praktikaformel berechnet werden.

$$J_G = \frac{mr^2}{2} \quad (7.2)$$

Die Masse des Maschinensatzes errechnet sich zu:

$$m_{SM} = V\rho = r_{SM}^2\pi\rho = (4cm)^2\pi \cdot 18cm \cdot 8.3\frac{g}{cm^3} = 7.51kg \quad (7.3)$$

$$m_{AM} = V\rho = r_{AM}^2\pi\rho = (3.5cm)^2\pi \cdot 15cm \cdot 8.3\frac{g}{cm^3} = 4.79kg \quad (7.4)$$

$$m_{ges} = m_{SM} + m_{AM} = 7.51kg + 4.79kg = 12.3kg \quad (7.5)$$

Und damit ergibt sich mit einem mittleren Radius von  $r = 4 \text{ cm}$  das gesamte Trägheitsmoment zu:

$$J_{ges} = \frac{12.3 \text{ kg} \cdot (0.04 \text{ m})^2}{2} = 0.0098 \text{ kgm}^2 \quad (7.6)$$

Durch Umformen der Formel für die kinetische Energie

$$W_{kin} = \frac{mv^2}{2} \quad (7.7)$$

kann eine Beziehung zwischen  $J$  und  $W_{kin}$  hergestellt werden. Wird für  $v = r\omega$  und für  $m = J/r^2$  in Gleichung 7.7 eingesetzt, ergibt sich:

$$W_{kin} = \frac{J\omega^2}{2} \quad (7.8)$$

Die Anlaufzeitkonstante  $T_J$  kann unter Vernachlässigung der Dämpfung (siehe [14]) mit

$$T_J = \frac{J\omega^2}{S_N p^2} \quad (7.9)$$

berechnet werden. Durch Aufspalten der Formel und einsetzen in 7.1 ergibt sich:

$$H = \frac{J\omega^2}{2} \cdot \frac{1}{S_N p^2} \quad (7.10)$$

Für den Term  $J\omega^2/2$  kann die kinetische Energie eingesetzt werden

$$H = W_{kin} \cdot \frac{1}{S_N p^2} \quad (7.11)$$

Und durch Umformen ergibt sich:

$$W_{kin} = S_N p^2 \cdot H \quad (7.12)$$

$$\frac{J\omega^2}{2} = S_N p^2 \cdot H \quad (7.13)$$

Da in der Gleichung alle Größen bis auf die Trägheitskonstante bekannt sind, kann diese einfach errechnet werden.

$$H = \frac{J\omega^2}{2S_N p^2} = \frac{0.0098 \text{ kgm}^2 \cdot (2\pi 50 \text{ s}^{-1})^2}{2 * 1000 \text{ VA} * 2^2} = 0.12 \text{ s} \quad (7.14)$$

Zur Dimensionskontrolle ist für die elektrische Leistung  $1 \text{ VA} = 1 \text{ kgm}^2/\text{s}^3$  einzusetzen.

## 7.2 Transformator

Betrachtet man das Prinzip- und Ersatzschaltbild (Abbildung 7.3 und 7.4) eines Transformators, so ist ersichtlich, welche Parameter zu bestimmen sind. Die gesuchten Größen können durch zwei Versuche ermittelt werden.

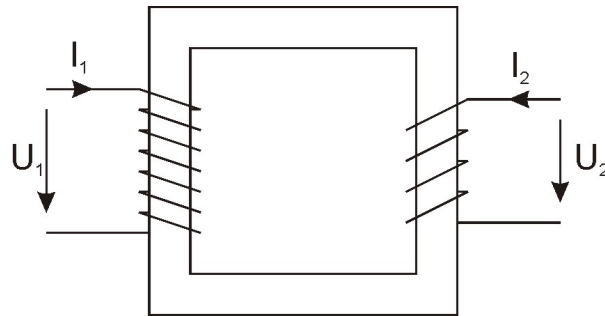


Abbildung 7.3: Prinzipschaltbild eines Transformators, [2]

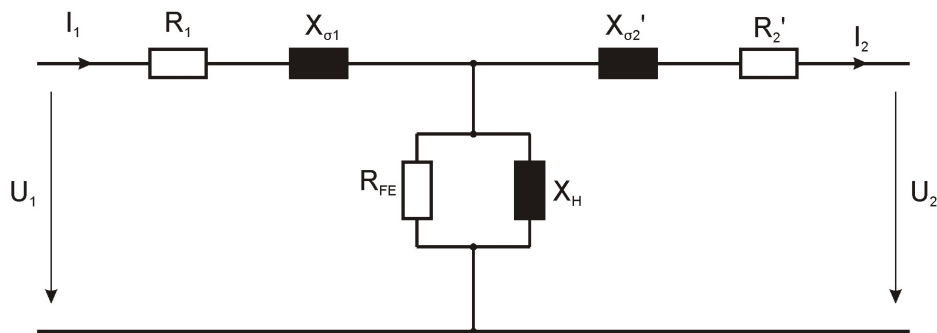


Abbildung 7.4: Ersatzschaltbild des Transformators, [2]

Für die Parameterbestimmung kann der Kurzschluss- sowie der Leerlaufversuch durchgeführt werden. Da die Daten der ohmschen Wicklungswiderstände und Reaktanzen für den Messversuch nicht wichtig sind, wird nicht näher auf die Parameterbestimmung eingegangen. Die Daten des verwendeten Transformators sind aus der Tabelle 7.3 ablesbar.

Typ	Wert	Einheit	Bemerkung
Leistung $S$	10	kVA	Datenblatt
Kurzschlussspannung $u_k$	2	%	Datenblatt
Nennspannung $U_N$	400	V	Datenblatt
Nennstrom $I_N$	15,1	A	Datenblatt
Frequenz $f_N$	50	Hz	Datenblatt

Tabelle 7.3: Nenndaten des Transformators

### 7.2.1 Schaltgruppe des Transformators

Wenn von einer Drehstromspeisung ohne Neutralleiter ausgegangen werden kann, ist ein Dy - Transformator (Abbildung 7.5 links) notwendig, damit auf der Niederspannungsseite ein Neutralleiter vorhanden ist. Bei vorhandener Vierleiter-Speisung kann ein Yy - Transformator (Abbildung 7.5 rechts) verwendet werden.

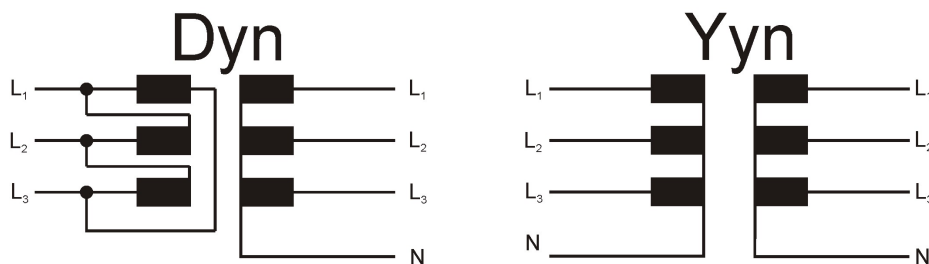


Abbildung 7.5: Schaltboard des Transformators

Der Transformator für den Messaufbau wird in der Schaltgruppe DY betrieben, damit auf der Sekundärseite der Neutralleiter verfügbar ist. Der Transformator kann in unterschiedlichen Schaltgruppen betrieben werden. In Abbildung 7.6 ist die Belegung der Oberseite zu sehen. Wie dieser Abbildung zu entnehmen ist, besteht die Primärwicklung aus einer einzigen Spule und die Sekundärwicklung aus zwei Spulen. Die sekundärseitigen Spulen werden in Serie verschaltet, um die volle Strangspannung abgreifen zu können.

Schenkel 1			Schenkel 2			Schenkel 3		
AP	A Sek1	A Sek2	AP	A Sek1	A Sek2	AP	A Sek1	A Sek2
○	○	○	○	○	○	○	○	○
Anz P	Anz Sek 1	Anz Sek 2	Anz P	Anz Sek 1	Anz Sek 2	Anz P	Anz Sek 1	Anz Sek 2
○	○	○	○	○	○	○	○	○
EP	E Sek1	E Sek2	EP	E Sek1	E Sek2	EP	E Sek1	E Sek2
○	○	○	○	○	○	○	○	○

Abbildung 7.6: Schalttafel am Transformator

AP	Anfang Primärspule
Anz P	Anzapfung Primärspule
EP	Ende Primärspule
A Sek1	Anfang Sekundärspule 1
Anz Sek1	Anzapfung Sekundärspule 1
E Sek1	Ende Sekundärspule 1
A Sek2	Anfang Sekundärspule 2
Anz Sek2	Anzapfung Sekundärspule 2
E Sek2	Ende Sekundärspule 2

Tabelle 7.4: Abkürzungen zu Abbildung 7.6

Um auf der Primärseite eine Spannung von 230 V zu realisieren, ist "AP" der Eingang und "Anz P" der Ausgang. Für die Sekundärseite ergibt sich für 230 V "A Sek1 - Anz Sek1 - A Sek2 - Anz Sek2".

Um die gewünschte Schaltgruppe des Transformators, nämlich Dyn zu erhalten, wird dieser wie in Abbildung 7.7 ersichtlich verdrahtet.

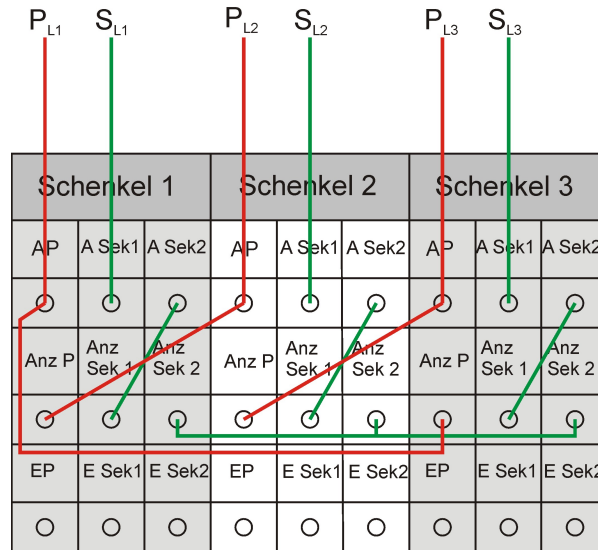


Abbildung 7.7: Verdrahtung Transformator (Schaltgruppe: Dyn)

## 7.3 Leitungsimpedanzen

Die Parameter der Leitungsimpedanzen sind so wählen, dass sie mit den typischen Werten für ein Niederspannungsnetz übereinstimmen. Da im Netzmodell Leitungsstücke für eine Hochspannungsleitung implementiert sind, sind diese Impedanzwerte für den konkreten Versuchsaufbau zu groß. Um zu große Ströme zu vermeiden, werden zusätzliche Widerstände eingefügt. Da ein spannungsstabiler Transformator verwendet wird, begrenzen die typischen Werte eines Niederspannungssystems die auftretenden Ströme kaum. Deshalb werden zusätzliche Widerstände eingefügt. Die Größe der notwendigen Wirkwiderstände ( $R_1$  und  $R_2$ ) werden aus den Kurzschlussströmen von Transformator und Synchronmaschine berechnet.

### 7.3.1 Synchronmaschinenseitiger Fehlerstromzweig

Mit den Nenndaten der Synchronmaschine (siehe Tabelle 7.1) kann der Strombegrenzerwiderstand  $R_2$  berechnet werden. In Abbildung 7.8 ist die Topologie des Netzes (vereinfachter Messaufbau von Abbildung 7.1) zu sehen.

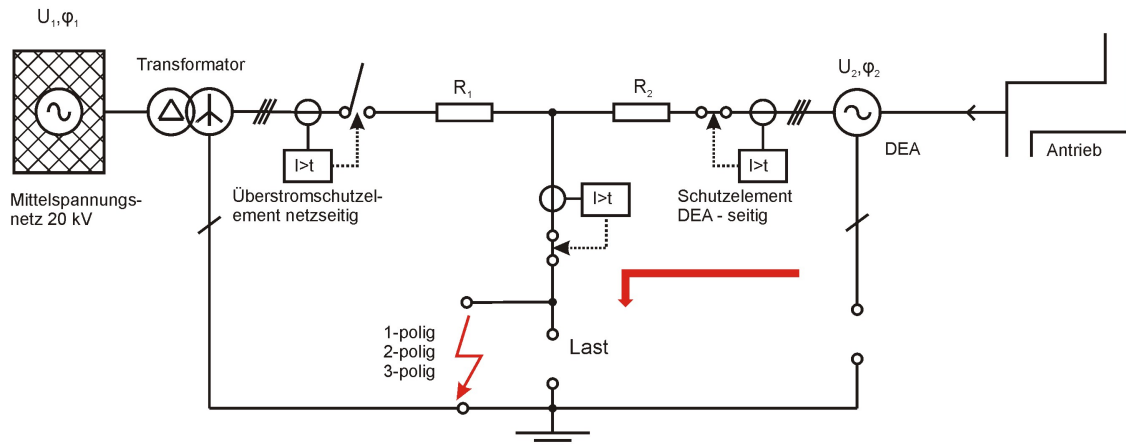


Abbildung 7.8: Synchronmaschinenseitiger Fehlerstromzweig - Prinzipdarstellung

Aus dem Leistungsdreieck (Wirk-, Blind- und Scheinleistung) kann bei gegebener Wirkleistung  $P$  und Leistungsfaktor  $\cos\varphi$  die Scheinleistung der Maschine berechnet werden. Da der Leistungsfaktor am Maschinensatz variabel einstellbar ist, wird zur Auslegung der Überstromschutzglieder der Strom für einen Leistungsfaktor von  $\cos\varphi = 0.8$  berechnet. Dieser Leistungsfaktor stellt den möglichen "worst case" Fall des Stromes dar.

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{0.8kW}{0.8} = 1000VA \quad (7.15)$$

Mit der gewonnenen Scheinleistung  $S$  kann der Strom der Synchronmaschine berechnet werden.

$$S = \sqrt{3}UI \rightarrow I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{1000VA}{\sqrt{3} \cdot 400V} = 1.44A \quad (7.16)$$

Aus der p.u Größe der stationären Reaktanz errechnet sich der Reaktanzwert zu:

$$X_d = \frac{x_{d(p.u.)}U^2}{S} = \frac{2.2 \cdot (400V)^2}{1000VA} = 352\Omega \quad (7.17)$$

Für die transiente Reaktanz ergibt sich:

$$X_d' = \frac{x_{d(p.u.)}'U^2}{S} = \frac{0.65 \cdot (400V)^2}{1000VA} = 104\Omega \quad (7.18)$$

Die Synchronmaschine wird durch den Sicherungsautomaten  $S_{S1}$  geschützt. Es ist wichtig, dass der Sicherungsautomat nicht auf den transienten Strom der Synchronmaschine reagiert. Durch Einsetzen der transienten Reaktanz  $x_d'$  aus Tabelle 7.1 kann der Spitzenwert des transienten Stromes durch

$$I_k' = \frac{I}{x_{d(p.u.)}'} = \frac{1.44A}{0.65} = 2.22A \quad (7.19)$$

ermittelt werden. Der subtransiente Strom kann aufgrund der sehr kleinen Zeitkonstante vernachlässigt werden.

Als Schutzelement wird ein träger Sicherungsautomat gewählt, der erst reagiert wenn, der transiente Strom länger als eine Sekunde am Sicherungsautomat anliegt. Mittels des Kurzschlussstromes kann der Begrenzungswiderstand  $R_2$  berechnet werden.

$$R_2 = \frac{U_{ph}}{I'_k} = \frac{230V}{2.22A} = 103.60\Omega \quad (7.20)$$

Gewählt wurde ein Begrenzungswiderstand  $R_2 = 300 \Omega$  mit einem Nennstrom von 2.2 A.

### 7.3.2 Transformatorseitiger Fehlerstromzweig

Mit den Nenndaten des Transformators (siehe Tabelle 7.3) kann der Strom sowie die Transformatorimpedanz bestimmt werden. In Abbildung 7.9 ist der dazugehörige Aufbau zu sehen.

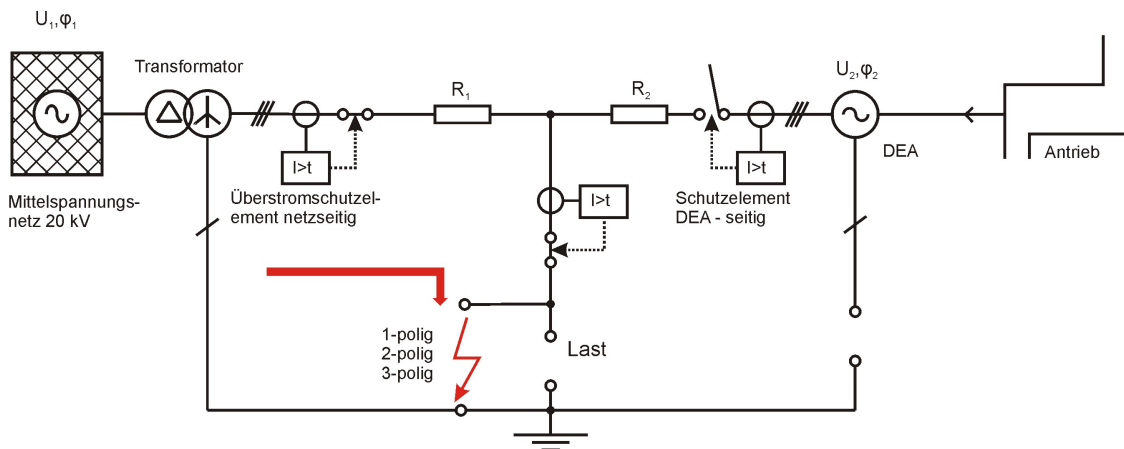


Abbildung 7.9: Transformatorseitiger Fehlerstromzweig - Prinzipdarstellung

Durch Umformen der Leistungsformel wird der Strom ermittelt.

$$S = \sqrt{3}UI \quad (7.21)$$

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad (7.22)$$

Mit den eingesetzten Nenndaten ergibt sich der Strom zu:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} = \frac{10kVA}{\sqrt{3} \cdot 400V} = 14.44A \quad (7.23)$$



Die Transformatorimpedanz lässt sich wie folgt bestimmen:

$$Z_T = \frac{u_k U^2}{S} = \frac{0.02 \cdot (400V)^2}{10kVA} = 0.32\Omega \quad (7.24)$$

Wird der Transformator bei voller Spannung kurzgeschlossen ergibt sich folgender Kurzschlussstrom:

$$I_{KS} = \frac{U_{ph}}{Z_T} = \frac{230V}{0.32\Omega} = 718.75A \quad (7.25)$$

Da das Netzmodell des Instituts für Elektrische Anlagen nicht für so hohe Kurzschlussströme ausgelegt ist, werden Widerstandselemente in den Versuchsaufbau implementiert. Angestrebt wird ein Kurzschlussstrom, welcher betragsmäßig in der Nähe des Nennstromes bzw. in der Größenordnung des transienten Kurzschlussstromes der Synchronmaschine liegt. Der Netzstrom wird mit 2 A angenommen. Wird als Bezugsgröße der Nennstrom der Synchronmaschine gewählt, ergibt sich folgender Wirkwiderstand:

$$R_1 = \frac{U_{ph}}{I} = \frac{230V}{2A} = 115\Omega \quad (7.26)$$

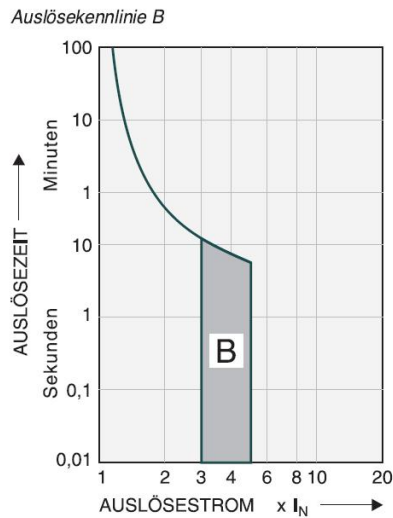
Wird der Wirkwiderstand auf den transienten Kurzschlussstrom ausgelegt ergibt sich folgender Wert:

$$R_1 = \frac{U_{ph}}{I} = \frac{230V}{2.2A} = 104\Omega \quad (7.27)$$

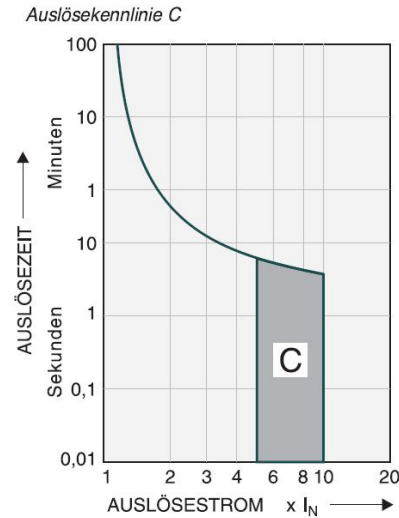
Als Wahl für den Begrenzungswiderstand  $R_1$  kann der Wertebereich von 104  $\Omega$  bis 115  $\Omega$  gewählt werden; der verwendete Begrenzungswiderstand hatte einen Nennstrom von 3,2A und einen maximalen Widerstandswert von 140  $\Omega$

## 7.4 Überstromschutzelement

Anhand der berechneten Fehlerströme von Transformator und Synchronmaschine können die Überstromschutzelemente ( $S_{N1}$ ,  $S_{N2}$ ,  $S_{N3}$  und  $S_{S1}$ ) dimensioniert werden. Im Messaufbau werden für die Überstromschutzelemente Sicherungsautomaten (Typ C3 sowie Typ C25) verwendet. Typ C Sicherungsautomaten reagieren bei einem 5- bis 10-fachen Nennstrom. Für die Messung ist es erforderlich, dass der Netzsicherungsautomat träger als die jener, die den Fehler abschaltet. Für die Lastseite wird ebenfalls ein Sicherungsautomat vom Typ C verwendet werden. Alternativ könnte ein Automat vom Typ B vorgeschaltet werden, da diese schon beim 3- bis 5-fachen Nennstrom reagiert. Realisiert wurde eine Kombination von einer starken C-25 Automaten und einem nachgeschalteten



(a) Sicherungsautomat Typ B



(b) Sicherungsautomat Typ C

C-3. Der-25-A Automat soll auftretende Einschaltströme überwachen und die C-3 Automaten übernehmen die Schutzfunktion, wenn die transienten Ströme unzulässig hoch werden. Die Auslösekennlinien werden dem Datenblatt entnommen

Für die Netzsicherung  $S_{N1}$  und  $S_{N2}$ , welche den Einschaltstrom des Transformators überwachen, wird jeweils der Typ C-25 gewählt. Zur Begrenzung der transienten Ströme werden die Sicherungsautomaten  $S_{N3}$  sowie  $S_{S1}$  als C-3 Typen ausgeführt. (siehe Anhang 11).

## 7.5 Fehlerauswahlschalter

Um einen Fehler im Messaufbau zu realisieren, wird parallel zur Last ein Fehlerschalter installiert (siehe Abbildung 6.14). Dem eigentlichen Fehlerschutz wird ein Auswahlschalter vorgeschaltet, mit welchem unterschiedliche Fehlerarten nachgebildet werden können. Mit diesem Auswahlschalter kann ein

- einpoliger
- zweipoliger
- dreipoliger

Isolationsfehler simuliert werden. Durch das Anlegen einer Spannung zwischen A1 - A2 schließt der Hauptkontakt des Schütz. Dadurch werden die drei Phasen auf den gewünschten Fehler kurzgeschlossen.

## 7.6 Messgrößen

Auf der Lastseite können mit dem Fehlerauswahlschalter unterschiedliche Fehlerzustände (Kurzschlüsse) erzeugt werden. Im Laborversuch wird das Verhalten der Synchronmaschine bei einem dreipoligen Fehler untersucht. Für die Messung wird das Dewetron Messsystem verwendet. Aufgezeichnet wurde:

- Messung an der Synchronmaschine
  - Drehzahl
  - Moment
  - Strangspannung
  - Strangstrom
- Messung am Transformator
  - Strangspannung
  - Strangstrom

Mit den gemessenen Größen können die Leistungen berechnet werden.

## 7.7 Zusammenfassung - Messaufbau

In Tabelle 7.5 ist eine Zusammenfassung aller notwendigen Daten für den relevanten Messaufbau zu sehen.

Typ	Wert	Einheit	Bemerkung
Transformatorimpedanz $z_T$	0.32	$\Omega$	siehe Kapitel 7.3.2
Widerstand $R_1$	140	$\Omega$	siehe Kapitel 7.3.2
Widerstand $R_2$	300	$\Omega$	siehe Kapitel 7.3.1
Ständerwiderstand $R_s$	10	$\Omega$	Messung
Stationäre Reaktanz $x_d$	2.2	p.u.	Datenblatt
Transiente Reaktanz $x_d'$	0.65	p.u.	Datenblatt
Subtransiente Reaktanz $X_d''$	kA	p.u.	-
Sicherungsautomat $S_{N1}$	-	Typ C-25	siehe Kapitel 7.4
Sicherungsautomat $S_{N2}$	-	Typ C-25	siehe Kapitel 7.4
Sicherungsautomat $S_{N3}$	-	Typ C-3	siehe Kapitel 7.4
Sicherungsautomat $S_{S1}$	-	Typ C-3	siehe Kapitel 7.4

Tabelle 7.5: Parameter für das vereinfachte Ersatzschaltbild

## 7.8 Abschätzung der Fehlerströme

Um die Versuchsergebnisse des Messversuchs (Kapitel 8) verifizieren zu können, wird eine Kontrollrechnung durchgeführt. Aufgrund des symmetrischen Aufbaus können die drei Phasen auf eine reduziert werden. Der Transformator und die Synchronmaschine können jeweils durch ihre Impedanzen vereinfacht dargestellt werden. In Abbildung 7.10 ist das einphasige Ersatzschaltbild des Versuchsaufbaus zu sehen.

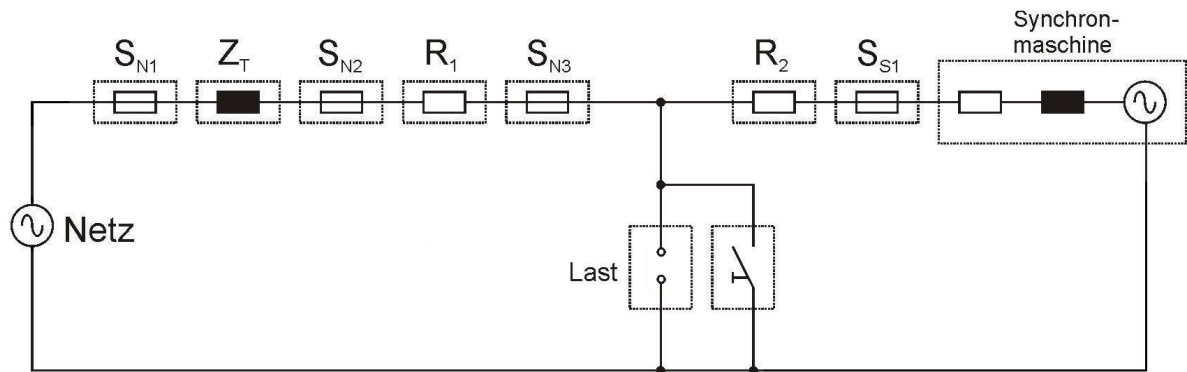


Abbildung 7.10: Einphasiges Ersatzschaltbild des Versuchsaufbaus

Durch Vernachlässigung der Sicherungselemente ergibt sich ein vereinfachtes Ersatzschaltbild (siehe Abbildung 7.11). Mittels der Berechnung der Fehlerströme kann eine Aussage über das Drehzahlverhalten der Synchronmaschine getroffen werden.

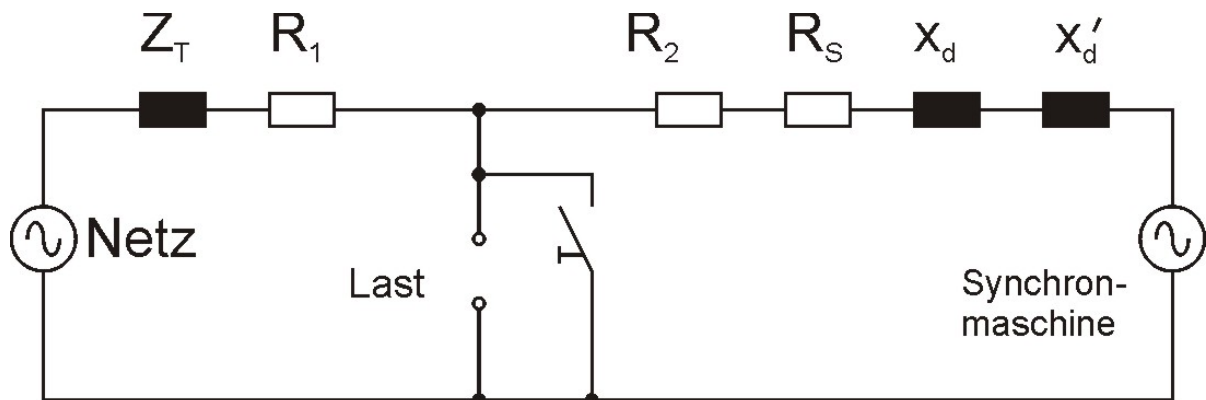


Abbildung 7.11: Vereinfachtes Ersatzschaltbild

Für die Berechnung werden die Parameter für den Wechselstromkreis aus Abbildung 7.11 werden die gewählten Daten aus Tabelle 7.5 herangezogen. Mit den Daten soll das Verhalten der Synchronmaschine abgeschätzt werden.

Als Annahme wird für die Berechnung folgendes getroffen: Wenn auf der Lastseite ein dreipoliger Kurzschluss erzeugt wird, kann das einphasige Ersatzschaltbild aus Abbildung 7.11 an der Fehlerstelle aufgesplittet werden. Die Berechnung vereinfacht sich auf zwei unabhängige Netzwerke. Die Synchronmaschine und das Netz speisen jeweils getrennt auf einen Kurzschluss.

Der netzseitige Kurzschlussstrom errechnet sich zu:

$$I_{kN} = \frac{U_{ph}}{R_1 + Z_T} = \frac{230.94V}{140\Omega + 0.32\Omega} = 1.65A \quad (7.28)$$

Für die Leistungseinspeisung, zur Berechnung der Synchronmaschinenseitigen Kurzschlussströme, wird ein Leistungsfaktor  $\cos\varphi$  von 0.8 angenommen, somit ergeben sich folgende Werte für Wirk - und Blindleistung:

$$P = S \cdot \cos\varphi = 1000VA \cdot 0.8 = 800W \quad (7.29)$$

$$\varphi = \arccos\varphi = \arccos(0.8) = 36.87^\circ \quad (7.30)$$

$$Q = S \cdot \sin\varphi = 1000VA \cdot \sin(36.87^\circ) = 600Var \quad (7.31)$$

$$S = P + jQ = 800W + j600Var \quad (7.32)$$

Mit dem gewählten Leistungsfaktor von  $\cos\varphi = 0.8$  und den berechneten Werten für Wirk - sowie Blindleistung kann der Stromanteil und die Polradspannungen der Synchronmaschine ermittelt werden.

$$S = \sqrt{3}\underline{U}\underline{I}^* \rightarrow \underline{I} = \frac{S^*}{\sqrt{3} \cdot U^*} = \frac{800W - j600Var}{\sqrt{3} \cdot 400} = 1.44e^{-j36.87^\circ} A \quad (7.33)$$

$$\begin{aligned} E &= U_{ph} + (jX_d + R_S) \cdot \underline{I} = \\ &= 230.94V + (j352 + 10) \cdot 1.44e^{-j36.87^\circ} A = 676.62e^{j36.00^\circ} V \end{aligned} \quad (7.34)$$

$$\begin{aligned} E' &= U_{ph} + (jX'_d + R_S) \cdot \underline{I} = \\ &= 230.94V + (j104 + 10) \cdot 1.44e^{-j36.87^\circ} A = 350.73e^{j18.52^\circ} V \end{aligned} \quad (7.35)$$

Bei der Berechnung der Kurzschlussströme wird auch die Annahme getroffen, dass das Netzsicherungselement schneller reagiert und die Synchronmaschine alleine auf den Fehler speist (einseitige Speisung). Als Fehlerwiderstand wird der "worst case" von  $R_{Fehler} = 0 \Omega$  eingesetzt.

$$\underline{I}_K = \frac{\underline{E}}{jX_d + R_S + R_1 + R_{Fehler}} = \frac{676.62e^{j36.00^\circ} V}{j352\Omega + 10\Omega + 103.6\Omega} = 1.82e^{-j36.10^\circ} A \quad (7.36)$$

$$\underline{I}_{K'} = \frac{\underline{E}'}{jX'_d + R_S + R_1 + R_{Fehler}} = \frac{350.73e^{j18.52^\circ} V}{j104\Omega + 10\Omega + 103.6\Omega} = 2.27e^{-j23.95^\circ} A \quad (7.37)$$

Die an den Widerstandselementen ( $R_2$  und  $R_S$ ) umgesetzte Leistungen ergibt sich zu:

$$P_{K'} = |I_{K'}|^2 \cdot R = |2.27e^{-j23.95^\circ} A|^2 \cdot 113.6\Omega = 589.09W \quad (7.38)$$

$$P_K = |I_K|^2 \cdot R = |1.82e^{-j36.10^\circ} A|^2 \cdot 113.6\Omega = 380.14W \quad (7.39)$$

Wie in Kapitel 6.5 mittels Simulationen und Berechnungen nachgewiesen wurde, nimmt beim Übergang vom transienten (Formel 7.38) zum stationären (Formel 7.39) Zustand die Leistung ab. Wird die Leistungsbilanz betrachtet, ergibt sich zwischen der eingespeisten und verbrauchten Leistung ein positiver Differenzbetrag und es erfolgt eine Beschleunigung der Synchronmaschine.

## 8 Auswertung des Messversuchs

Für den konkreten Versuchsaufbau wurde der Schaltplan aus Abbildung 7.2 aufgebaut. Für den Messaufbau wird der Lastwiderstand vernachlässigt, da dieser im Fehlerfall durch den Kurzschluss überbrückt wird und für die Betrachtungen nebensächlich ist. In Abbildung 8.1 ist der tatsächliche Messaufbau zu sehen.

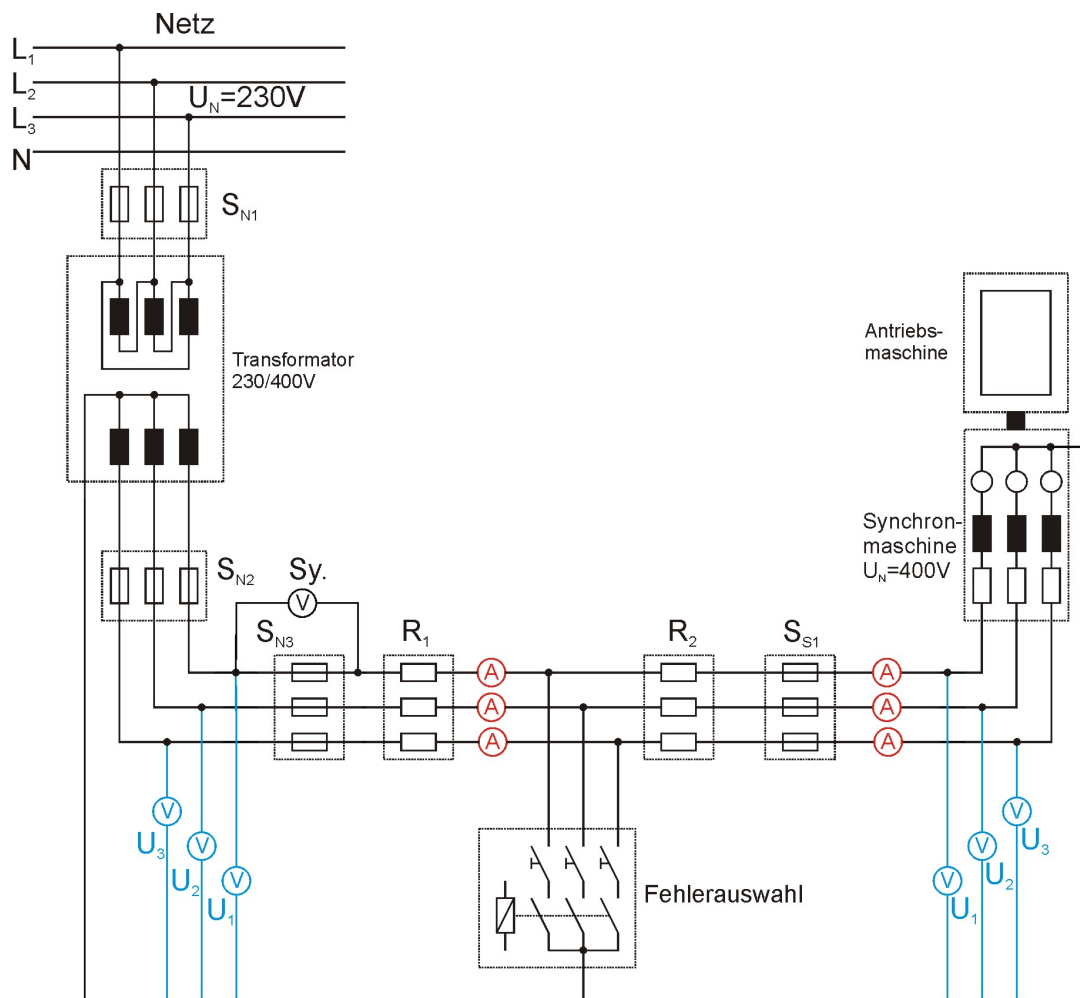


Abbildung 8.1: Messaufbau im Netzmodell

Für die verwendeten Sicherungsautomaten und dem Fehlerauswahlschalter wurden eige-



ne berührsichere Module angefertigt, welche im Zuge einer Messung beliebig verschaltet werden können. Um verschiedene Fehler zu generieren, besteht das Fehlermodul aus drei Schaltern sowie einem Schütz. Mit dem Betätigen der Schalter kann ein drei-, zwei- und einpoliger Fehler vorgewählt werden. Anhand eines zusätzlichen Schalters die Hauptspule des Schützes betätigt werden und dadurch wird eine leitende Verbindung zwischen spannungsführende Leitern und Erde generiert.

Ein Problem bei der Messung war es, dass bei der dreiphasigen Laborversorgung eine verkettete Spannung von 230 V, anstelle von 400 V, vorgegeben wurde. Durch umstecken des Transformators konnte erreicht werden, dass eine verkettete Spannung von 400 V auf der Sekundärseite zur Verfügung stand. In Abbildung 7.7 ist bereits die richtige Zusammenschaltung der Spulen, Schaltgruppe des Transformators Dyn, zu sehen.

Um die Funktionstüchtigkeit der Schaltung zu prüfen, wurden die einzelnen Elemente der Reihe nach zugeschaltet. Das Sicherungselement  $S_{N3}$  diente bei der Messung als Synchronisierschalter zwischen Netz und Synchronmaschine.

## 8.1 Bedienung für Hochfahren und Zuschalten

Damit an den Klemmen der Synchronmaschine eine Spannung anliegt, ist eine Erregerquelle erforderlich. Als Erregung wird eine Gleichspannungsquelle verwendet, welche stromgeregelt betrieben wird. Dabei wird bei der Regelung der maximale Spannungsbereich eingestellt und der Strom variiert, bis zwischen den Phasen eine Spannung von 400 V messbar ist. Von einer Steuereinrichtung kann die Synchronmaschine über eine Antriebsmaschine in jeden beliebigen Betriebspunkt gebracht werden. Zusätzlich führt das Steuergerät eine Drehzahlbegrenzung durch. Für die Drehzahleinstellung an der Synchronmaschine sind folgende Arbeitsschritte durchzuführen:

1. PRG - Taste betätigen [Bewirkt Menüauswahl]
2. Speicherstelle 37 auswählen [Aufruf der Drehzahlbegrenzung]
3. PRG - Taste betätigen [Änderungen durchführen]
4. Maximale Drehzahl vorgeben [Drehzahl eingeben]
5. PRG - Taste betätigen um die Drehzahl zu speichern [Maximale Drehzahl festgelegt]

Nachdem die maximale Drehzahl vorgegeben wurde, kann durch Verstellen der mechanischen Belastung der Antriebsmaschine die Synchronmaschine gestartet werden. Da die Klemmenspannung noch nicht den gewünschten Wert hat, kann durch Erhöhen der Erregerspannung bzw. des Erregerstromes die Klemmenspannung auf den erforderlichen Wert gebracht werden.

Damit eine Synchronmaschine zu einem starren Netz zugeschaltet werden darf, sind folgende Bedingungen aus [16] zu erfüllen:

- Gleichheit zwischen Netzspannung und Maschinenklemmenspannung
- Gleichheit der Frequenzen
- Gleichheit der Phasenfolgen
- Gleichheit der Phasenlagen

### 8.1.1 Synchronisierungsbedingungen

- Gleichheit der Spannungen

Die Phasenspannung des Netzes ist fest vorgegeben. Um eine Zuschaltung der Synchronmaschine durchführen zu können, ist die Klemmenspannung an die vorhandene Netzspannung anzupassen. Für die Variation der Klemmenspannung wird der Erregerstrom der Synchronmaschine verändert. Bei erfolgreicher Regelung besitzen beide Quellen (Netz und Synchronmaschine) die gleiche Amplitude der Phasenspannungen.

- Gleichheit der Frequenzen

Für die Netzzuschaltung ist die Gleichheit von Netzfrequenz und Synchronmaschinenfrequenz erforderlich. Um die Frequenz bestimmen zu können, kann die Drehzahl der Maschine in U/min gemessen und auf U/sec umgerechnet werden. Durch die Aufzeichnung der Spannungsverläufe der gleichen Phase von Netz und Synchronmaschine kann durch Vergleichen der Signalverläufe festgestellt werden, ob die Frequenz beider Quellen gleich oder einander verschieden ist. In Abbildung 8.2 ist ein Vergleich zwischen der Quellenspannung und der Klemmenspannung der Synchronmaschine zu sehen.

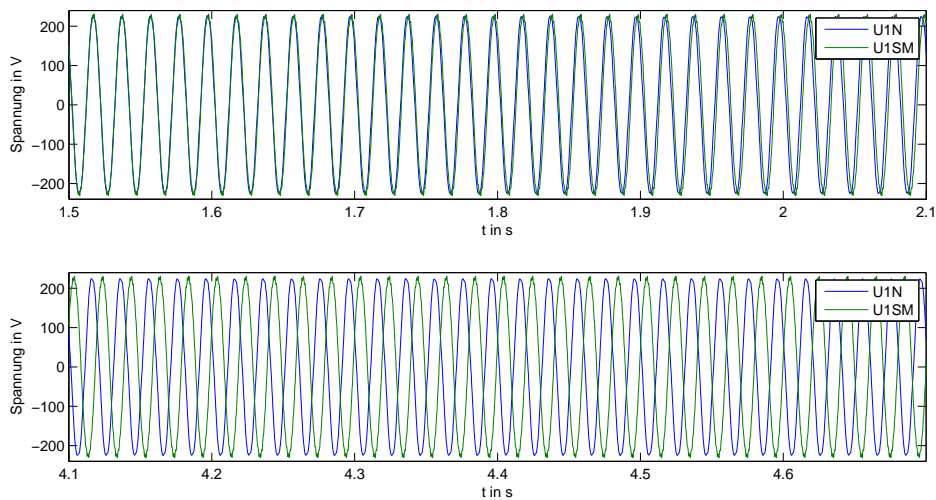


Abbildung 8.2: Verläufe von Quellenspannung und der Klemmenspannung der Synchronmaschine, oben: defacto Synchronismus, unten: asynchrone Phasenopposition

Das obere Bild aus der Abbildung zeigt den optimalen Zeitpunkt einer Netzzuschaltung. Durch das Abweichen der Synchronmaschinenfrequenz wächst die Phasenverschiebung der Klemmenspannung gegenüber der Netzspannung an. Im unteren Bild ist der Zeitpunkt der Phasenopposition zu sehen.

- Gleichheit der Phasenfolgen

Als weitere Zuschaltbedingung ist es erforderlich, dass die Phasenfolge der Klemmen- und Netzspannung identisch ist. Es bedeutet, dass die Reihenfolge, in welcher die Phasen  $L_1$ ,  $L_2$  und  $L_3$  den Nulldurchgang erreichen, gleich ist. Bestimmt wird die Phasenfolge durch die Messung der Spannungen mit dem Dewetron Messsystem. Vom Netz und Synchronmaschine wurde die Spannungsmessung Phase für Phase entfernt und geprüft welcher Spannungszeiger zu Null wird. Somit konnten die Phasen untereinander zugeordnet werden.

Zur Kontrolle messen drei Voltmeter die Differenzspannungen am Synchronisierschalter - Prinzip der Dunkelschaltung. Wenn sich an allen Voltmetern die Spannung gleich verhält, sind die Phasen richtig zugeordnet und es kann eine Synchronisierung stattfinden.

- Gleichheit der Phasenlagen

Unter Phasenlage ist die Phasenverschiebung zwischen der Netzspannung und der Klemmenspannung zu verstehen. Laufen beide Zeiger synchron und ohne Phasenverschiebung um, ist die Differenzspannung Null (oberes Bild aus Abbildung 8.2). Sind die Quellen um  $180^\circ$  phasenverschoben, tritt eine Differenzspannung mit der zweifachen Phasenspannung auf (unteres Bild aus Abbildung 8.2). Die Phasenlage wurde im Messversuch mit drei Voltmetern überprüft. Am offenen Synchronisierschalter  $S_{N3}$  wurde in jeder Phase die Spannungsdifferenz von Netz und Synchronmaschinenspannung gemessen. Abbildung 8.3 zeigt das Messprinzip für eine Phase. Je kleiner die Differenz zwischen beiden Frequenzen ist, umso langsamer

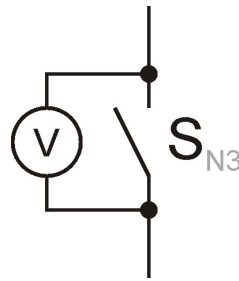


Abbildung 8.3: Messung der Differenzspannung am Synchronisierschalter  $S_{N3}$

ändert sich die Differenzspannung über dem Synchronisierschalter. Die Zeitdauer der Differenzspannungsänderung errechnet sich zu:

$$f_{diff} = f_n - f_{Sm} \quad (8.1)$$

$$t_{diff} = \frac{1}{f_{diff}} \quad (8.2)$$

Ist die angezeigte Spannung am Voltmeter ein Minimum (identisch Null), so kann die Synchronmaschine zum übergeordneten Netz zugeschaltet werden.

## 8.2 Zuschalten und Kurzschluss des Transformators

Da Transformatoren beim Einschalten einen großen Strom vom Netz beziehen und die Spannungsquelle im Netzmodell eventuell beschädigt werden könnte, wurde der Widerstand  $R_1$  vorübergehend von der Sekundärseite auf die Primärseite verlegt. Durch diese Maßnahme konnte ein auftretender Inrush - Strom unter Kontrolle gehalten werden. Während des Einschaltvorgangs mit maximalem Widerstandswert  $R_1 = 140 \Omega$  wurden

die Ströme kontrolliert. Da kein nennenswerter Inrush - Strom aufgetreten ist, wurde der Wirkwiderstand sukzessiv verringert. Bei der Zuschaltung bei  $R_1 = 0 \Omega$  kam es zu keiner unzulässigen Stromerhöhung. Der Dauerstrom lag in der Größenordnung des Magnetisierungsstroms von 0.6 A.

In Tabelle 8.1 sind die gemessenen stationären Magnetisierungsströme am Transformator (primärseitig) zu sehen. Dabei wurden die Extremfälle  $R_1 = \max$  und  $R_1 = \min$  gemessen. Zusätzlich wurde die Spannung auf der Sekundärseite gemessen.

Phase Nr.	Widerstand maximal (140Ω)		Widerstand minimal (0Ω)	
	I	U	I	U
-	A	V	A	V
L <sub>1</sub>	0.22	345	0.60	398
L <sub>2</sub>	0.20	345	0.55	400
L <sub>3</sub>	0.16	318	0.48	396

Tabelle 8.1: Tabelle der Transformatorströme

Aus der Tabelle 8.1 ist zu entnehmen, dass der Magnetisierungsstrom durch Verringerung der Widerstände zu steigen beginnt. Im Zuge dieser Messung wurde anschließend der Widerstand von der Primärseite wieder zur Sekundärseite zurückverlegt - wie in Abbildung 8.1. Anschließend wurden die Ströme und Spannung nochmals gemessen - siehe Tabelle 8.2.

Phase Nr.	Widerstand auf der Sekundärseite	
	I	U
-	A	V
L <sub>1</sub>	0.60	397
L <sub>2</sub>	0.54	396
L <sub>3</sub>	0.48	400

Tabelle 8.2: Strom und Spannung bei Rückbau der Widerstände

Nach der Rückverlegung des Widerstandes auf die Sekundärseite wurde die Funktionstüchtigkeit des Transformators geprüft. An den Klemmen der Primärseite wurden 230 V angelegt und sekundärseitig konnte, wie erwartet, eine verkettete Spannung von 400 V gemessen werden. Anschließend wurde ein Kurzschlussversuch durchgeführt, und die

auftretenden Ströme wurden aufgezeichnet. Als errechneter Strom, wegen der vernachlässigbaren kleinen Transformatorimpedanz ( $Z_T = 0.32\Omega$ ), ergibt sich:

$$I_{sek} = \frac{U_{ph}}{R} = \frac{230.94V}{140\Omega} = 1.64A \quad (8.3)$$

Der Strom auf der Primärseite ( $U_N = 230V$ ) übersetzt sich mit dem Faktor  $\sqrt{3}$ .

$$I_{pr} = I_{sek} \cdot \sqrt{3} = 1.64A \cdot \sqrt{3} = 2.84A \quad (8.4)$$

Mit dem Versuch wurden die berechneten Werte (siehe Formel 8.3 und 8.4) bestätigt, und in Tabelle 8.3 liegen die Messwerte vor.

Phase	Primär	Sekundär
Nr.	I	I
-	A	A
L <sub>1</sub>	3.11	1.58
L <sub>2</sub>	2.96	1.60
L <sub>3</sub>	3.10	1.60

Tabelle 8.3: Gemessene Ströme von Primär- und Sekundärseite beim Kurzschlussversuch

## 8.3 Versuche

### 8.3.1 Filterung der Signale

Bevor die Auswertung der Signale vorgenommen werden kann, müssen Filterungsalgorithmen genauer betrachtet werden. Die aufgezeichneten Signale zeigen, dass die Leistungskanäle im Gegensatz zu Strom- und Spannungskanälen mit 1/1000 der Abtastrate aufgezeichnet werden. Um auch für die Leistungsausgabe dieselbe Genauigkeit zu erhalten, muss für jeden Kanal die Leistung nach

$$p_{Ph}(t) = u_{Ph}(t) \cdot i_{Ph}(t) \quad (8.5)$$

berechnet. Damit aussagekräftige Verläufe für weitere Untersuchungen vorhanden sind, ist das errechnete Leistungssignal einer Filterung zu unterwerfen. In diesem Fall wurde eine Bandpassfilterung der Signale durchgeführt. Abbildung 8.4 zeigt den Vergleich zwischen einem ungefilterten und gefilterten Leistungssignal.

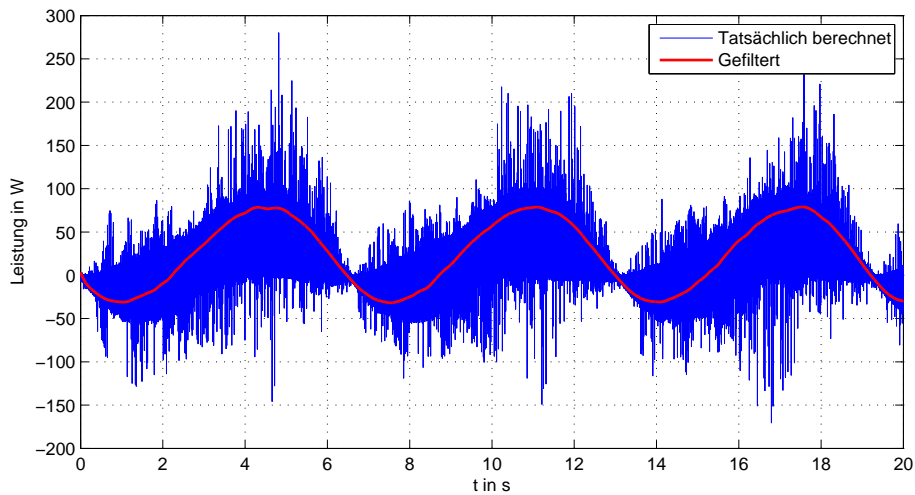


Abbildung 8.4: Gegenüberstellung ungefilterter und gefilterter Leistungssignale

### 8.3.2 Synchronmaschine mit Drehzahlvorgabe (Inselnetzbetrieb)

Die Synchronmaschine wird mit konstanter Drehzahl betrieben und speist als einzige Quelle auf einen dreipoligen Fehler. Mittels der Drehzahlregelung wird die Maschinendrehzahl vorgegeben. Die Spannung an der Fehlerquelle bricht zusammen und steigt zur speisenden Quelle an. Während des Fehlers ändert sich die Drehzahl der Maschine nicht. In Abbildung 8.5 sind die Ströme und Spannungen bei Fehlereintritt und Fehlerklärung zu sehen. Bei Betrachtung des Stromverlaufs ist ein kurzer dynamischer Einschwingvorgang auf den stationären Kurzschlussstrom zu erkennen. Nach Fehlerklärung erlischt der Stromfluss und an den Klemmen ist die Nennspannung der Synchronmaschine messbar.

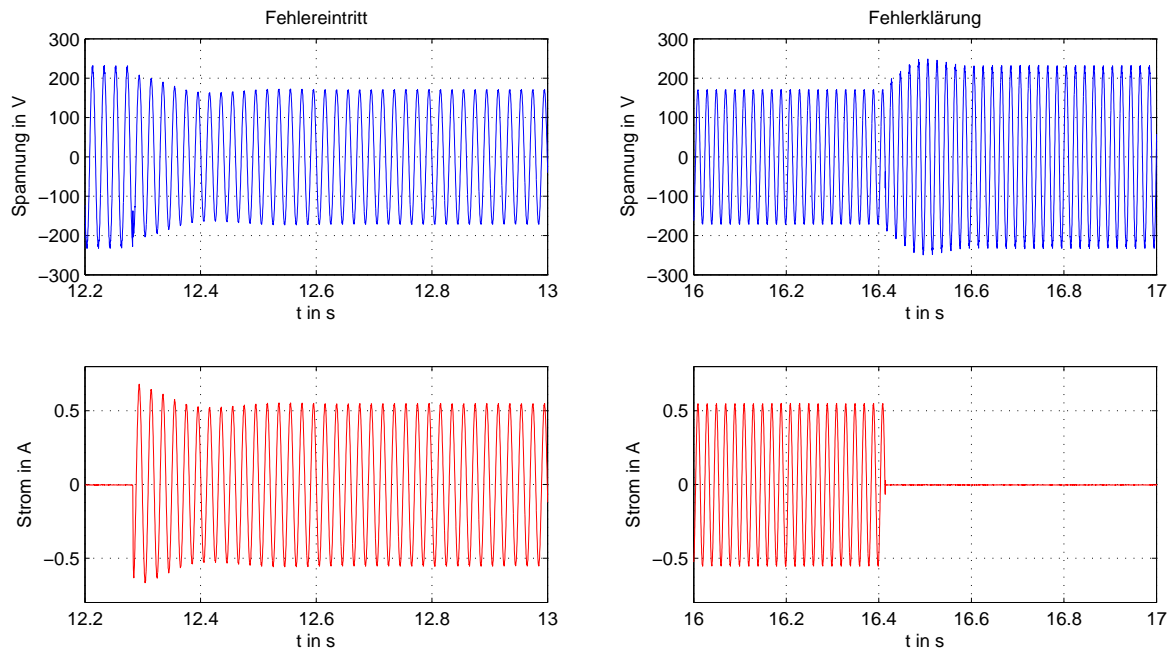


Abbildung 8.5: Ströme und Spannung bei Fehlereintritt und -klärung,

### 8.3.3 Synchronisierung ans Netz

Unter Einhaltung der Synchronisierungsbedingungen kann eine Netzzuschaltung erfolgen. Da die Synchronmaschine mit einer fest vorgegebenen Frequenz betrieben wird bzw. mit vorgegebener Drehzahl umläuft, entspricht die Netzfrequenz nicht der Synchronmaschinenfrequenz. Nach der Synchronisierung müsste in einem realen Netzparallelbetrieb des Generators die Antriebsregelung des Aggregats (z.B. einer Dampfturbine) von "Drehzahlregelung" auf "Leistungsregelung" (mit z.B. vorgegebener Leistungsänderungsgeschwindigkeit und vorgegebener Basislast) sofort umgeschaltet werden. Um die Auswirkung einer fehlenden Reglerumschaltung, die für reale dezentrale bestehende Anlagen anzunehmen ist nachzuweisen, wurde der Versuch ohne diese Umschaltung durchgeführt. Daher kommt es nach der Synchronisation, wegen der Vorgabe einer übersynchronen Drehzahl, zu einer Leistungseinspeisung in den Generator, der über seine Stabilitätsgrenze angetrieben wird. Diese Stabilitätsgrenze wird bereits nach ca. 5 Sekunden erreicht. Abbildung 8.6 zeigt den Vergleich beider Frequenzen (Netzfrequenz und Generatorfrequenz) und deren Differenz. Die Schwingung der Synchronmaschinen tritt dadurch auf, dass die Leistungsabgabe nach dem Kippen des Generators nicht konstant ist.



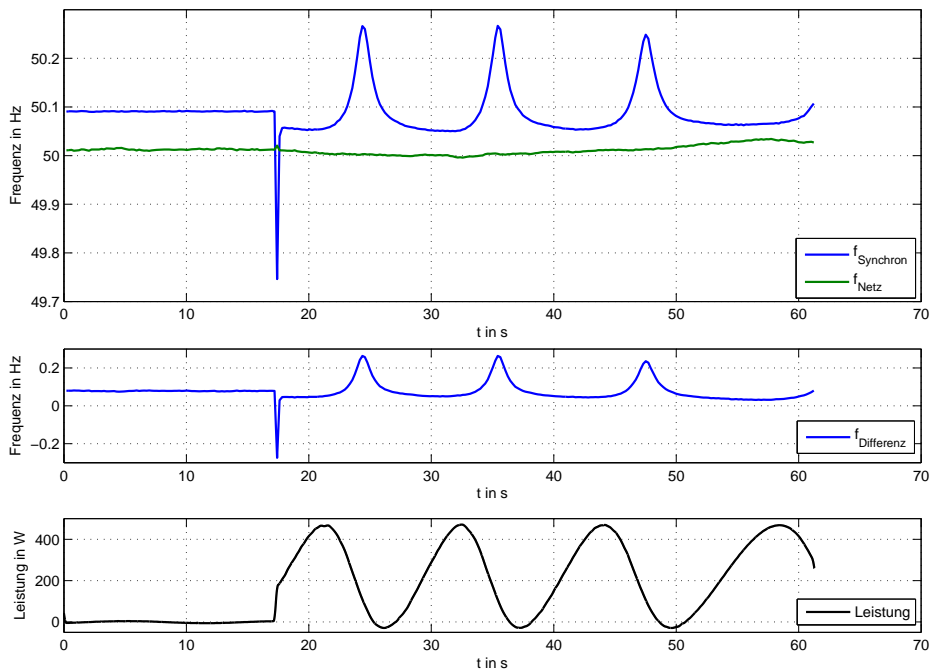


Abbildung 8.6: Vergleich von Netzfrequenz und Synchronmaschinenfrequenz

Da der Spannungstern der Synchronmaschine schneller umläuft als der des Netzes (siehe Abbildung 8.2 und 8.8) entsteht eine Schwebung von Klemmenspannung, -strom und Leistungsabgabe. Abbildung 8.7 zeigt Spannung und Strom bei nicht netzfrequent betriebener Synchronmaschine. Aus dem Kurvenverlauf kann entnommen werden, dass die Synchronmaschine mit einer von 50 Hz verschiedenen Frequenz betrieben wird.

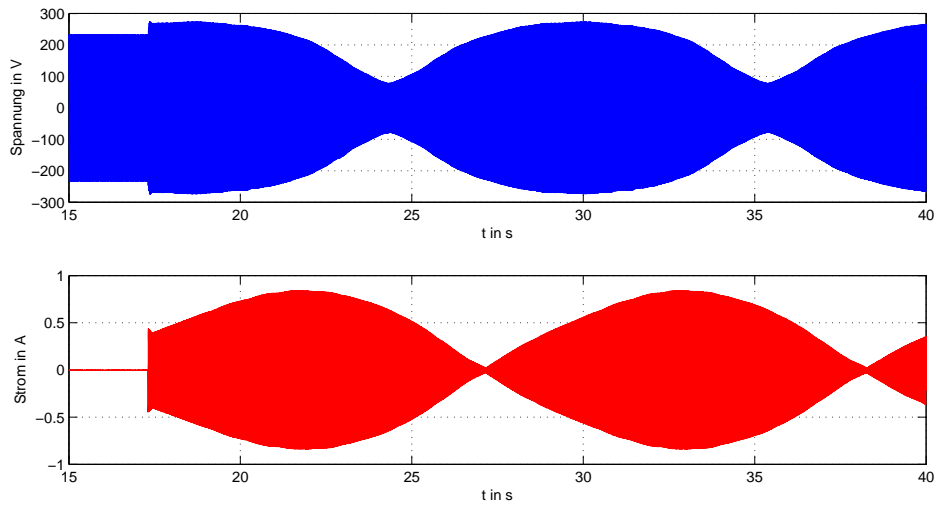


Abbildung 8.7: Spannung und Strom - Schwebung

Abbildung 8.8 zeigt die Phasenspannungen von Netz und Synchronmaschine. Da sich die Zeiger nicht synchron zueinander drehen, wird die Phasenverschiebung immer größer. Im Zeitpunkt der Phasenopposition herrscht maximale Phasenverschiebung.

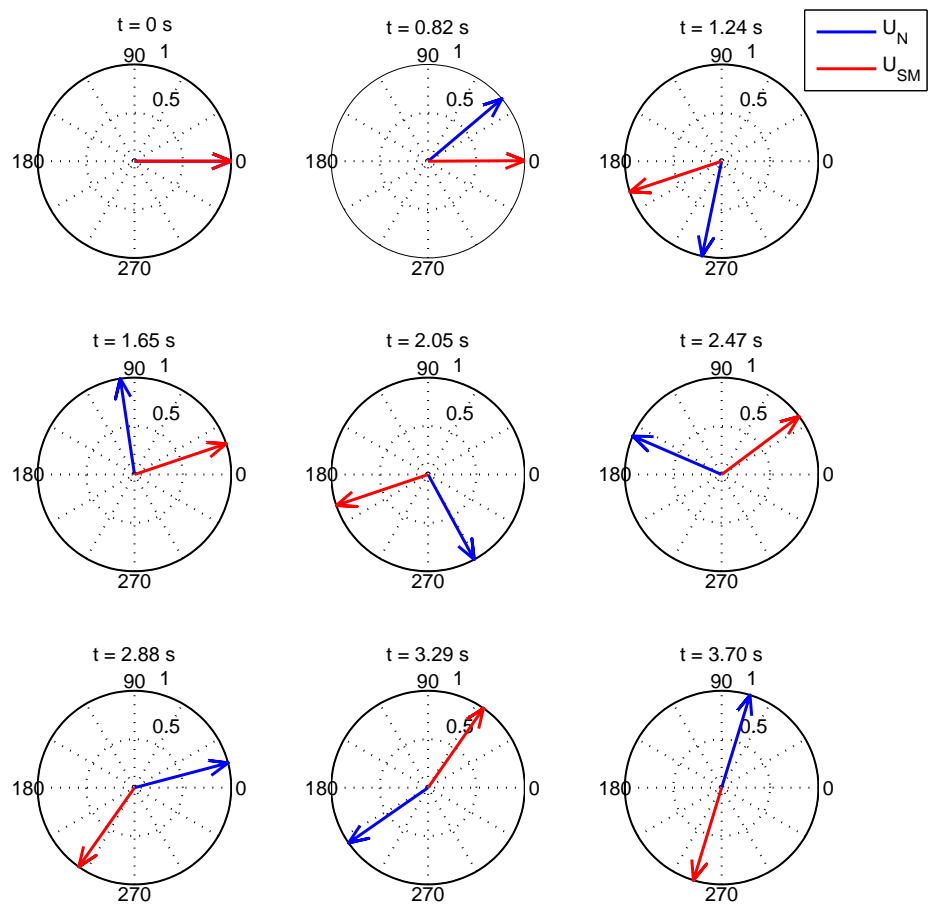


Abbildung 8.8: Asynchroner Spannungsumlauf

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Durch den zunehmenden Anstieg von dezentralen Energieerzeugungsanlagen ist die Kenntnis vom Betriebsverhalten von besonderer Bedeutung, wobei zwischen dem stationären und dynamischen Verhalten zu unterscheiden ist. Als dezentrale Energieerzeugungsanlage wird eine Synchronmaschine verwendet. In dieser Arbeit wird, ausgehend vom stationären Betriebsverhalten, das dynamische Verhalten einer Synchronmaschine im Niederspannungsnetz untersucht. Als Analysesoftware wird das Simulationsprogramm *Matlab/Simulink*<sup>®</sup>, in welchem ein Modellnetz simuliert wird. Für die Synchronmaschine wird das implementierte Modell zur Untersuchung der dynamischen Zustände herangezogen. Die verwendete Synchronmaschine versorgt im Parallelbetrieb mit dem Netz eine Last.

Neben den Simulationen werden Berechnungen relevanter Aufgabenstellungen durchgeführt, um die Ergebnisse der Simulation verifizieren zu können. Mit Hilfe der vereinfachten Modelle kann das Verhalten beschrieben werden. Ursache für einen dynamischen Übergang kann ein Leistungsungleichgewicht, ein Kurzschluss, eine Leitungsabschaltung oder eine Netzabschaltung angesehen werden. Abhängig von Leistungsungleichgewicht an der Synchronmaschine, wird das Polrad beschleunigt oder verzögert.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass das Verhalten der Synchronmaschine im Fehlerfall von verschiedenen Netz- und Maschinenparametern abhängig ist. Bei Fehlereintritt und Netzabschaltung speist die Synchronmaschine weiter auf den Fehler. Da zu diesem Zeitpunkt eine elektrische Entlastung vorliegt, ist eine Beschleunigung des Polrades die Folge. Aus den Simulationen geht hervor, dass der stationäre Fehlerstrom der Synchronmaschine in der Nähe des Nennstromes liegt. Synchron mit der Polradrotation läuft der Spannungstern um. Damit das Netz wieder zugeschaltet werden kann, sind die Synchronisierungsbedingungen einzuhalten. Da jedoch der Spannungszeiger der Synchronmaschine schneller als mit 50 Hz umläuft, ist es schwierig, für das Zuschalten den richtigen Zeitpunkt zu finden.

Zusätzlich zu den Simulationen und Berechnungen wurde ein Laborversuch mit den vorhandenen Maschinensatz im Netzmodell durchgeführt. Dabei ist eine richtig Dimensionierung der verwendeten Sicherungsautomaten notwendig, damit ein sicherer Laborbetrieb gewährleistet werden kann. Zusätzlich sind die elektrischen (Widerstände und Reaktanzen von Transformator und Synchronmaschine) und mechanischen Parameter (z.B. Anlaufzeitkonstante) der verwendeten Geräte zu erfassen. Damit der Laborversuch einfach und sicher gestaltet werden kann, werden verschiedenen Module angefertigt (z.B. Sicherungsmodule, ein Fehlerauswahlmodul). Die Sicherungsautomaten sind nach den auftretenden Fehlerströmen dimensioniert.

Mit den Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass dezentrale Energieerzeugungsanlagen infolge eines Kurzschlusses vom Netz zu trennen sind. Der Grund liegt darin, dass nach Netzzrückkehr eine Synchronisierung fehlschlagen kann und die Synchronmaschine immer weiter beschleunigt. Die Beschleunigung ist vom Trägheitsmoment sowie von den auftretenden Verlusten bestimmt. Je größer das Trägheitsmoment ist, umso langsamer beschleunigt die Synchronmaschine und kann leichter ans Netz synchronisiert werden.

### **Ausblick:**

In dieser Arbeit wurde das Verhalten von einer Synchronmaschine im Niederspannungsnetz bei Kurzschlüssen auf der Verbraucherseite analysiert. Um der Beschleunigung entgegenzuwirken, können Wirkwiderstände zugeschaltet werden, damit die mechanisch eingespeiste Leistung verbraucht wird. Alternativ kann auch die Einspeiseleistung reduziert werden. Jedoch stellt sich bei Erweiterung des Netzes um zusätzliche Dezentralen Energieerzeugungsanlagen ein neues Betrachtungsbild dar. Bei Verwendung von zwei oder mehreren Synchronmaschinen stellt sich die Frage, wie sich die Maschinen im Falle eines Fehlers bei gleichen bzw. unterschiedlichen Trägheitsmomenten verhalten. Darf in diesem Fall eine Synchronisierung stattfinden? Ist es möglich mit beiden Maschinen auf einen Ersatzverbraucher zu speisen, um nach Fehlerklärung wieder am Netz zu arbeiten? Synchronisieren sich 2 Maschinen gegenseitig? Kann eine Maschine als Motor arbeiten und die andere belasten? Für spätere Simulationen ist ein Vergleich der Ergebnisse zwischen der Phasor und Continuous-Simulationsmethode, bezüglich der Richtigkeit der Ergebnisse, aufzustellen.

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] BONFERT, K.: *Betriebsverhalten der Synchronmaschine*. Springer Verlag, 1962.
- [2] DANNERER, G.: *Vorlesungsunterlagen zu "Energiewandler"*. Institut für elektrische Antriebstechnik und Maschinen, Technische Universität Graz, 2008.
- [3] DANNERER, G.: *Vorlesungsunterlagen zu "Elektrische Maschinen und Antriebe, Labor"*. Institut für Elektrische Antriebstechnik und Maschinen, Technische Universität Graz, 2009.
- [4] FICKERT, L.: *Vorlesungsunterlagen zu "Elektrische Energiesysteme 1"*. Institut für elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 2008.
- [5] FICKERT, L.: *Vorlesungsunterlagen zu "Schutz und Versorgungssicherheit elektrischer Energiesysteme"*. Institut für elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 2009.
- [6] KOVÁCS, RÁCZ: *Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen*. Verlag der ungarischen Akademie der Wissenschaften, Band I Auflage, 1959.
- [7] KRAUSE, P.: *Analysis of Electric Machinery*. McGrawHill, 1986.
- [8] LAIBLE, T.: *Die Theorie der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb*. Maschinenfabrik Oerlion, Zürich, 1952.
- [9] M. HORN, N. DOURDOUMAS: *Regelungstechnik*. VBE Verlag Technik Berlin, 1976.
- [10] MUCKENHUBER, R.: *Vorlesungsunterlagen zu "Elektrische Anlagen", Teil 1*. Institut für elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 1981.
- [11] MUCKENHUBER, R.: *Vorlesungsunterlagen zu "Elektrische Anlagen", Teil 2*. Institut für elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 1984.
- [12] MUCKENHUBER, R.: *Vorlesungsunterlagen zu "Elektrische Anlagen", Teil 3*. Institut für elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 1985.

- [13] MUELLER, G.: *Elektrische Maschinen - Berechnung rotierender elektrischer Maschinen*. VBE Verlag Technik Berlin, 1988.
- [14] RENNER, H.: *Vorlesungsunterlagen zu "Regelung und Stabilität elektrischer Energiesysteme"*. Institut für elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 2009.
- [15] RENNER, H.: *Vorlesungsunterlagen zu "Spannungsqualität und Versorgungszuverlässigkeit"*. Institut für elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 2010.
- [16] RICHTER, R.: *Elektrische Maschinen - Synchronmaschine und Einankerumformer*. Birkhauser Verlag, 1963.
- [17] SCHMAUTZER, E.: *Vorlesungsunterlagen zu "Sicherheit und Schutzmaßnahmen"*. Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 2010.
- [18] WINDHOLZ, L.: *Vorlesungsunterlagen zu "Physik"*. Institut für Experimentalphysik, Technische Universität Graz, 2006.

# 11 Anhang

Die für die Messung gefertigten Module wurden so gewählt, dass diese eventuelle im Netzmodell bzw. auf einen beweglichen Wagen eingebaut werden können. Für die Sicherungsautomaten sowie dem Fehlerauswahlschalter wurde die Größe der Module auf eine A4 Seite angepasst. Um beim ersten Aufbau Sicherheit zu gewährleisten wurden die Module auf Holzplatten befestigt. Folgend sind die Pläne für die Module angefügt.

## 11.1 Stückliste

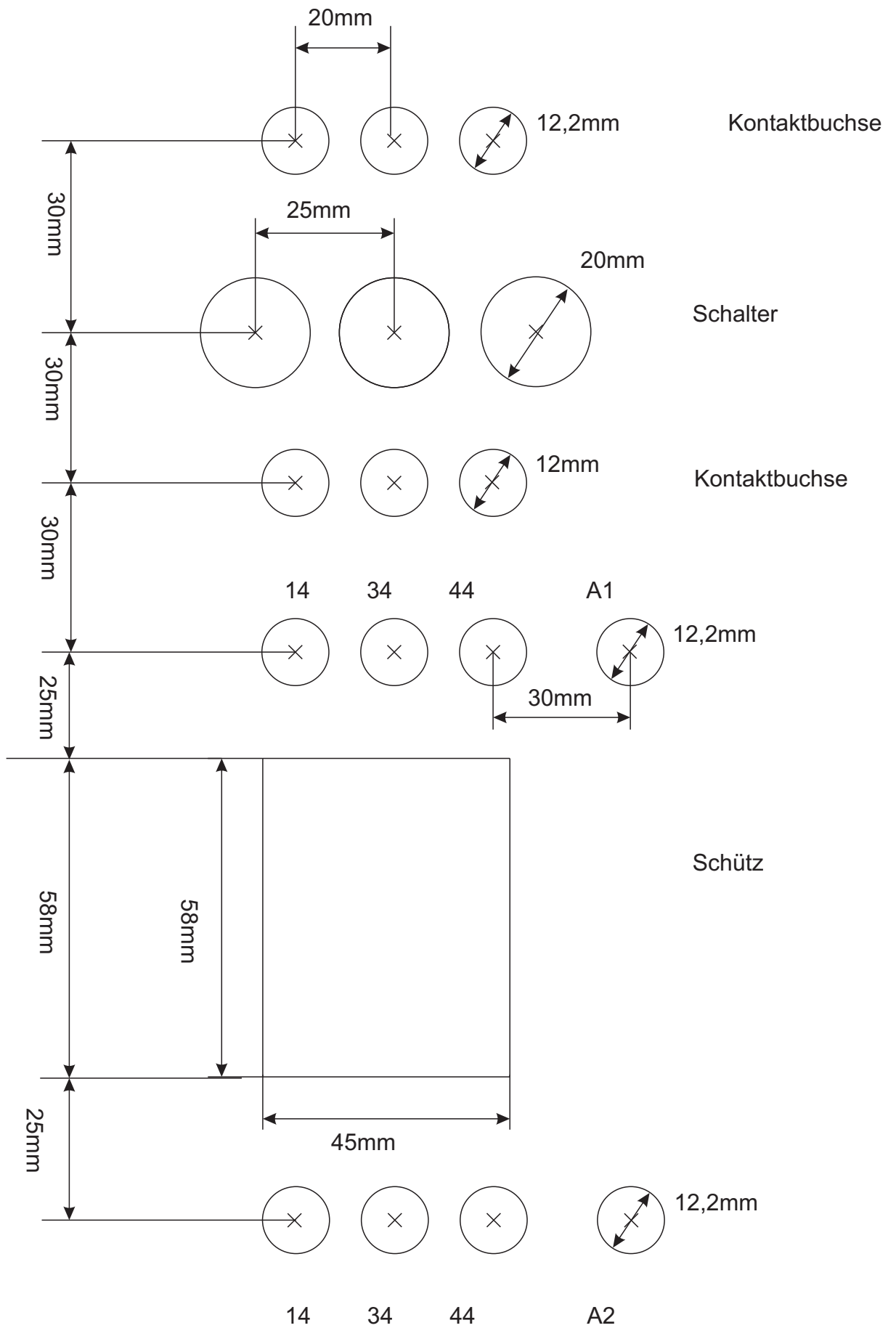
Für den Aufbau wurden folgende Elemente verwendet:

Schaltplan	Bezeichnung	Nr.
$S_{N1}$ und $S_{N2}$	ABB Sicherungsautomat Typ C25	5354302
$S_{N3}$ und $S_{S1}$	Siemens Sicherungsautomat Typ C3	622-0092
Fehlerauswahl	Moeller Kleinschütz	326-683

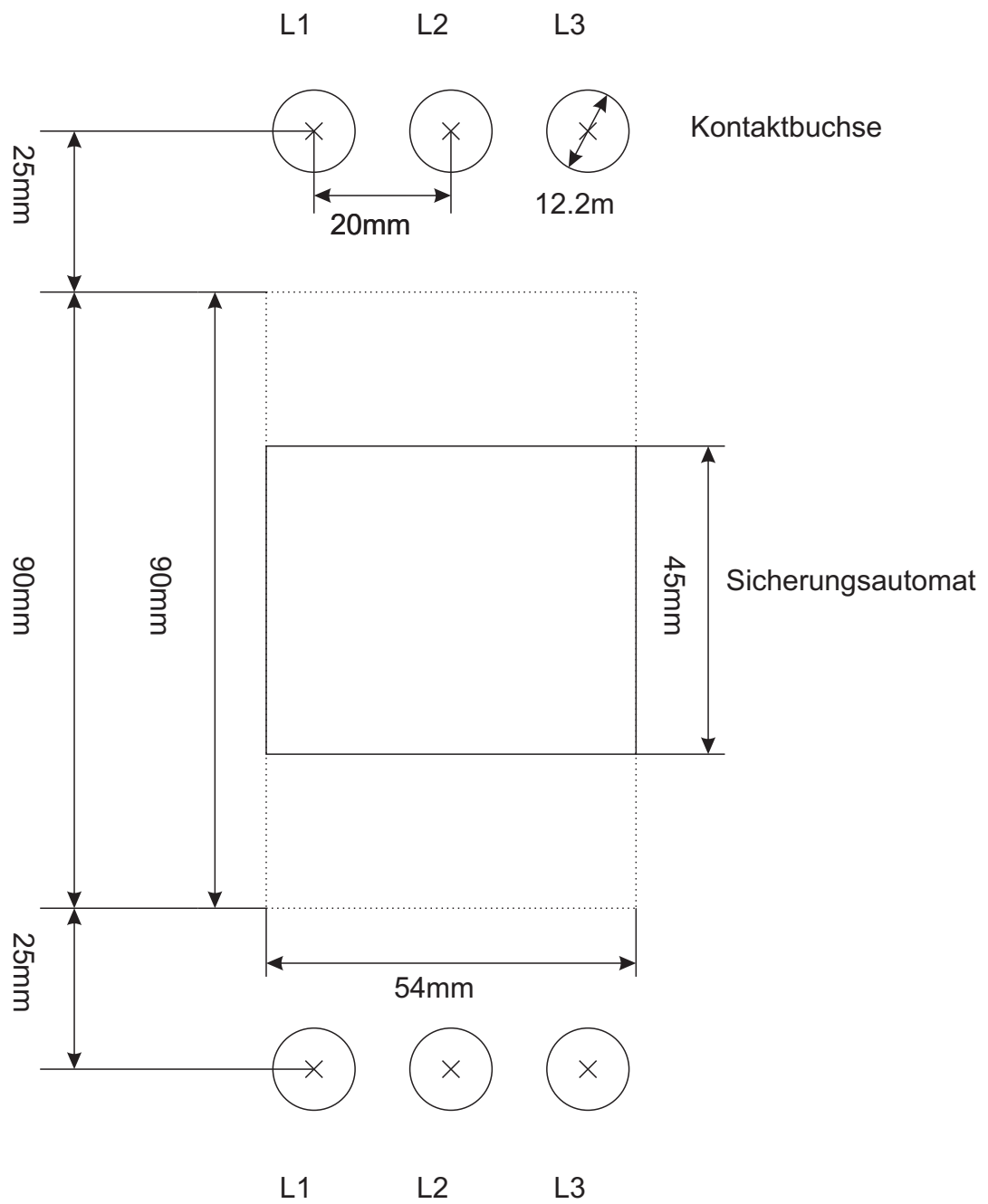
Tabelle 11.1: Stückliste

## 11.2 Bohr- und Schaltpläne





# Sicherungsmodul



# Fehlerauswahl - Modul

# Sicherungsmodul

